

# **HABILITATION à DIRIGER des RECHERCHES**

**Eric BONJOUR**

Ingénieur ENSMM, Docteur de l'Université de Franche-Comté,  
Maître de conférences rattaché à l'  
Université de Franche-Comté, UFR Sciences et Techniques,  
Institut FEMTO-ST / Département AS2M

---

## **Contributions à l'instrumentation du métier d'architecte système : de l'architecture modulaire du produit à l'organisation du système de conception**

---

Présentée à l'Université de Franche-Comté le 17 novembre 2008  
devant le jury composé de Messieurs :

### ***Président***

**Gérard Morel**, Professeur ..... Univ. Henri Poincaré - Nancy 1

### ***Rapporteurs***

**Michel Aldanondo**, Professeur ..... Ecole des Mines - Albi-Carmaux

**Améziane Aoussat**, Professeur ..... ENSAM - Paris

**Bernard Grabot**, Professeur ..... ENIT - Tarbes

### ***Examineurs***

**Emmanuel Caillaud**, Professeur ..... Univ. Louis Pasteur - Strasbourg 1

**Nicolas Chaillet**, Professeur ..... Université de Franche-Comté

**Dominique Loise**, Resp. pôle Processus de développement GMP ..... PSA Peugeot Citroën



# Avant-propos

---

En préliminaire, il apparaît nécessaire d'expliciter le titre donné à ce mémoire :

"Contributions à l'instrumentation du métier d'architecte système : de l'architecture modulaire du produit à l'organisation du système de conception"

Il s'agit aussi de le mettre en regard d'un cheminement de recherche, nourri par de nombreuses analyses de terrain.

Depuis 1998, nos recherches se sont toujours situées dans le domaine de la conception des systèmes complexes, résultats d'une conception multidisciplinaire impliquant de multiples métiers.

Dès 1999, un projet de recherche en collaboration avec PSA Peugeot Citroën a alimenté nos réflexions et orienté une partie des thèmes de recherche sur lesquels nous avons travaillé. D'abord positionnés sur le thème "modélisation et pilotage des systèmes de compétences en conception", nom retenu dans le cadre d'une JEM STIC CNRS (2001-2002), nous avons progressivement pris conscience de l'impact de l'architecture du produit sur les performances globales du projet et du produit, en raison des conséquences qu'elle induit sur les choix organisationnels.

Profitant du financement obtenu par le projet mentionné précédemment, nous avons engagé, en 2002, deux thèses sur des orientations de recherche complémentaires. La première concernait la conception modulaire de famille de produits et devait nous permettre d'acquérir une bonne connaissance des travaux internationaux et des méthodes existantes. En parallèle, la seconde orientation devait développer une nouvelle vision du pilotage des systèmes de compétences dans les activités de conception, en s'appuyant sur les caractéristiques propres aux situations de conception.

La convergence de ces deux orientations a été assurée par le lancement en 2003 d'une troisième thèse dont l'objectif était de relier l'architecture modulaire d'un produit avec les choix organisationnels retenus dans un projet de conception. Ce positionnement s'est imposé comme une nécessité suite aux entretiens que nous avons pu mener avec des ingénieurs qui occupaient une fonction en émergence au sein de PSA : l'architecte système. Il a été confirmé par les nombreuses relations industrielles que nous avons pu nouer avec des ingénieurs, des chefs de projets et des architectes de PME-PMI des secteurs de l'ameublement et de la construction bois qui, certes à une autre échelle, avaient les mêmes préoccupations : définir au mieux l'architecture du produit et organiser le projet de façon appropriée. Cette nouvelle orientation nous a permis de recentrer notre recherche sur le produit, au cœur de la conception et à caractère structurant pour l'organisation du système de conception.

Cependant, dans le troisième sujet de thèse, les liens vers la constitution d'une équipe projet, et donc vers l'importance de l'évolution des compétences au sein du système de conception, n'étaient pas envisagés et manquaient, par conséquent, pour unifier la vision globale d'un architecte système. Ce thème a fait l'objet d'un sujet de thèse lancé en 2005.

Dans ce mémoire, nous présentons une synthèse de nos contributions visant à répondre à des besoins en instrumentation d'un métier<sup>1</sup> en émergence : architecte système. Nous entendons par "instrumentation", le développement de modèle, méthode et outil informatique permettant de supporter une activité, ou plus précisément ici, de fournir une aide à la décision. De ce fait, nous soulignons l'importance de définir clairement les concepts utilisés et la méthode permettant d'aboutir aux résultats souhaités en utilisant l'outil informatique.

Nous postulons qu'en ingénierie système, l'architecture d'un produit est structurante pour l'organisation du projet de conception correspondant. Généralement, une entreprise conçoit un ensemble de produits semblables et dans ce cas, l'architecture du produit est structurante sur les groupements de compétences de conception que développe ou externalise l'entreprise pour améliorer ses performances et posséder un avantage concurrentiel. Traditionnellement, on parle de l'organisation par (ou du) projet et de la structuration des Métiers de la conception. Nous avons choisi d'utiliser le concept le plus global, celui de système de conception. Nous reviendrons sur ce concept au Chapitre 6 (§6.2, §6.3). Aujourd'hui, les frontières de ce système sont parfois délicates à définir en raison de l'implication forte de certains fournisseurs<sup>2</sup> dans les projets d'innovation et de conception. Ce cadre peut dépasser les limites de responsabilité d'un ingénieur "architecte système" mais il convient de penser plus globalement cette fonction, au niveau de l'entreprise concernée, qui peut se définir comme un architecte, intégrateur ou systémier.

Nous avons organisé ce mémoire en **huit parties**.

La **Partie I** présente une synthèse de nos activités de recherche, d'animation scientifique et d'enseignement. Nous résumons notre parcours scientifique, notre problématique, nos contributions majeures. Nous montrons nos implications dans l'animation et l'encadrement de la recherche. Nous présentons différentes facettes de la fonction de responsable de formation pour montrer la richesse en collaboration qu'elles requièrent mais aussi leur caractère. Enfin, nous synthétisons les enseignements que nous avons dispensés, essentiellement à des étudiants de niveau Licence et Master.

La **Partie II** présente notre production scientifique.

La **Partie III** est décomposée en 3 chapitres qui introduisent et précisent la problématique de recherche.

Après une introduction générale, nous montrons que l'activité de conception est depuis une dizaine d'années en mutation avec une complexification des exigences, des solutions technologiques, des outils, des méthodes, des organisations et du pilotage des systèmes de conception. Nous concluons ce chapitre en montrant que l'Ingénierie Système est une réponse globale visant à maîtriser au mieux la complexité des systèmes et de leur conception.

Le deuxième chapitre présente une structuration de la recherche en conception menée dans le domaine des Sciences et Techniques de la Production. Cette synthèse permet de réaliser un positionnement global de nos travaux de recherche, qui s'intéressent d'une part à des outils de représentation de l'architecture du produit et d'autre part, à la conception de l'organisation du système de conception.

Le troisième chapitre présente notre projet de recherche : l'instrumentation du métier d'architecte système. Parmi les activités d'un architecte, nous retenons deux activités critiques qui structurent l'ensemble de nos contributions de recherche : identifier l'architecture d'un produit et

---

<sup>1</sup> De façon semblable à A. Cauvin [2005], nous définissons le métier comme l'ensemble des activités, connaissances et savoir-faire spécifiques à une profession, relatifs à la conception et à la fabrication des produits et des procédés. Ces activités, connaissances et savoir-faire constituent une culture technique partagée par les acteurs du métier et qui leur confère une identité (appartenance, reconnaissance).

<sup>2</sup> Plus généralement, comme en ingénierie système, nous devrions parler des "parties prenantes".

concevoir l'organisation du système de conception. Nous présentons alors une synthèse de l'état de l'art pour positionner précisément nos contributions.

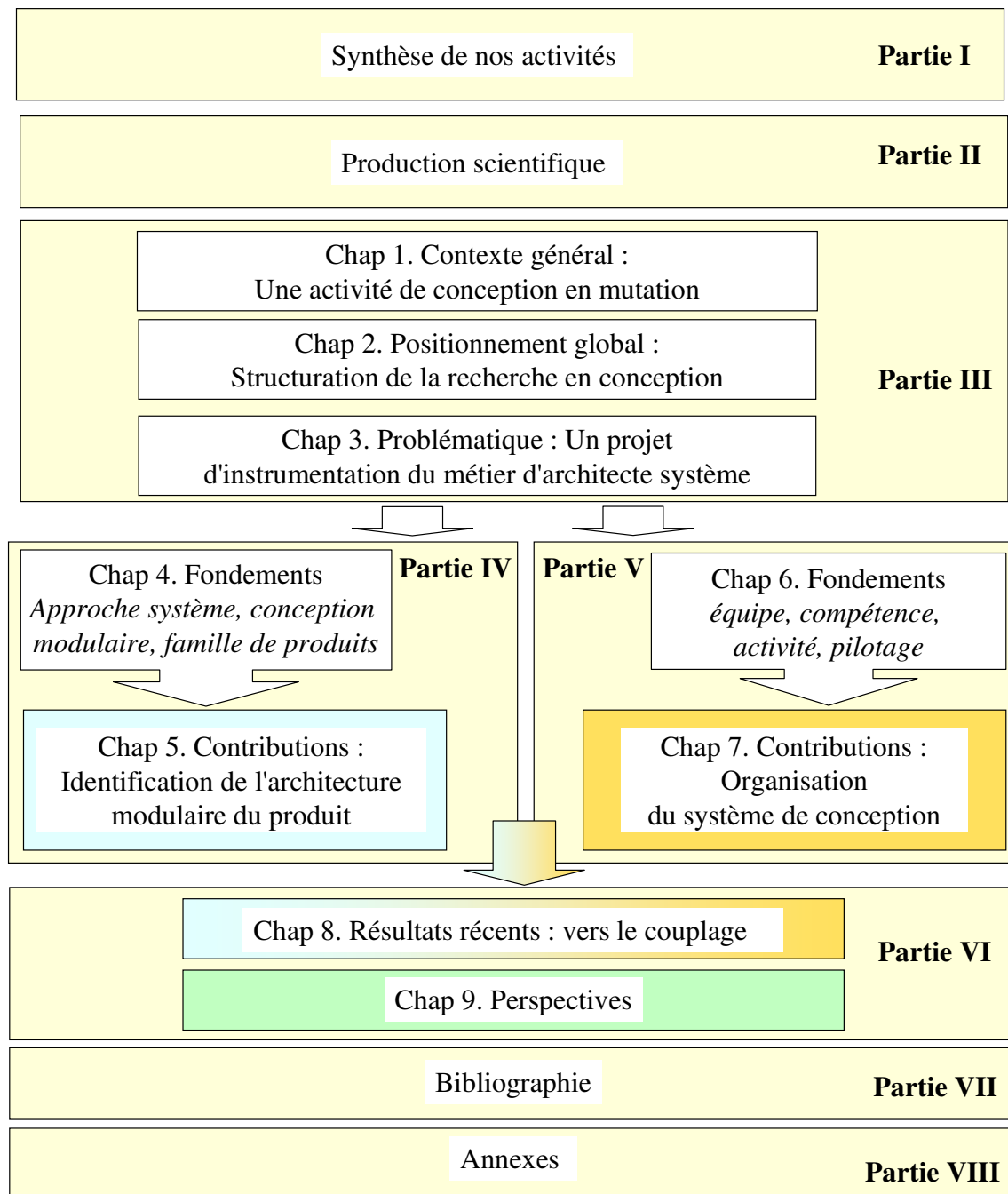


Figure 1 : Structure générale du document

Les parties IV et V présentent nos principales contributions et sont structurées de la même manière : un chapitre sur les fondements conceptuels et l'état de l'art, puis un autre sur nos contributions.

Ainsi, dans la **Partie IV**, le Chapitre 4 présente les fondements de l'architecture modulaire d'un système. Nous revenons brièvement sur les concepts clés de l'approche système, qui est centrale dans la modélisation des systèmes complexes. Nous développons un état de l'art sur la conception modulaire et sur la conception de famille de produits. Le Chapitre 5 est une synthèse de nos contributions concernant l'identification de l'architecture modulaire du produit.

Dans la **Partie V**, le Chapitre 6 présente un état de l'art sur la conception de l'organisation du système de conception, en particulier de l'organisation d'un projet. Nous proposons une analyse des activités de conception et de leur pilotage. Le Chapitre 7 présente nos contributions à l'organisation d'un système de conception.

La **Partie VI** développe des résultats récents, dresse un bilan de nos travaux et explore des perspectives de ce projet de recherche. Ainsi, le Chapitre 8 expose des résultats de recherche récents qui ouvrent des pistes de recherche intéressantes, sur le couplage entre l'architecture des produits et l'architecture de l'organisation du projet. Le Chapitre 9 présente une synthèse et des perspectives de notre projet de recherche.

La **Partie VII** contient les références bibliographiques.

**La Partie VIII est composée des ANNEXES.** Elle est présentée dans un document séparé, appelé "**Document ANNEXES**".

Dans l'Annexe 1, nous dressons une liste de laboratoires internationaux travaillant sur l'architecture modulaire d'un produit ou d'une famille de produits.

Dans l'Annexe 2, nous présentons le contexte du projet de recherche que nous avons mené avec PSA Peugeot Citroën.

Dans l'Annexe 3, nous fournissons un complément concernant une méthode proposée.

Dans l'Annexe 4, nous proposons des définitions de concepts clés pour la modélisation des activités de conception.

De l'Annexe 5 à l'Annexe 9, nous reproduisons des publications majeures qui permettent de développer différentes contributions que nous avons seulement synthétisées dans ce mémoire :

- Annexe 5. [R.5] X. Boucher, **E. Bonjour**, B. Grabot, "Formalisation and use of competencies for industrial performance optimisation: a survey", Computers in industry, Vol. 58, N°2, February 2007, pp. 98-117
- Annexe 6. [R.7] G. Harmel, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "Simulating change propagation between product architecture and development organization", International Journal of Product Development, A paraître en 2008, 20p.
- Annexe 7. [R.8] O. Hlaioittinun, **E. Bonjour** and M. Dulmet, "A Multidisciplinary team building method based on competency modelling in design project management", International Journal of Management Science and Engineering Management, accepté pour publication en 2008, 15p.
- Annexe 8. [R.10] F. Belkadi, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "De la modélisation des situations de travail à la caractérisation des compétences : une approche par la logique floue", JESA, Journal Européen des Systèmes Automatisés, accepté pour publication en 2008, 37p.
- Annexe 9. [R.11] B. Mtopi, M. Dulmet, **E. Bonjour**, "Modélisation par les grammaires de graphes de la génération de la diversité dans les familles de produits", JESA, Journal Européen des Systèmes Automatisés, Hermès Science, accepté pour publication en 2008, 30p.

Concernant les quatre dernières publications, le premier auteur est un doctorant que nous avons co-encadré.

A noter que les "drafts" de ces publications sont présents dans HAL.

En ce qui concerne les références à des travaux scientifiques dans le texte, nous avons choisi le codage suivant :

- pour nos publications, nous les avons numérotées entre crochets en indiquant la nature de la publication par une ou deux lettres : R pour Revue, CI pour Communications Internationales avec comité de lecture et actes, Ch pour Chapitre d'ouvrage. La numérotation suit la chronologie des publications.
- pour les autres publications, nous avons choisi une formulation internationale traditionnelle, en rappelant entre crochets, soit le nom de l'auteur et l'année de parution, soit les noms des deux auteurs et l'année de parution, soit dans le cas de plus de deux auteurs, le nom du premier auteur suivi de "*et al.*", et l'année de parution.
- dans le cas d'une énumération de plusieurs publications, nous nous sommes autorisés à ouvrir un crochet au début de la liste et à fermer un crochet en fin de liste. Par exemple, [CI.2, 5] signifie [CI.2], [CI.5]. Nous avons utilisé le - pour représenter une suite de numéros, par exemple : [CI. 2-5] signifie [CI.2], [CI.3], [CI.4], [CI.5].

# Remerciements

---

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au sein du LAB, puis au sein du département AS2M de l'Institut FEMTO-ST (après intégration du LAB dans FEMTO-ST). Je remercie le directeur de AS2M, Nicolas Chaillet, pour son soutien et les conditions de travail cordiales qu'il sait créer au sein du département. Tantôt collègue et ami, tantôt directeur, je lui suis aussi reconnaissant pour ses conseils lors la préparation de cette HDR et pour sa participation à l'évaluation de mes travaux. Une pensée toute particulière pour Alain Bourjault, "mon" directeur pendant 14 années, décédé récemment, ainsi qu'à Joyce, son épouse.

Je tiens à remercier vivement les rapporteurs du mémoire d'HDR pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'évaluer ce travail :

- Michel Aldanondo, professeur à l'École des Mines d'Albi Carmaux, pour ses encouragements et de précieuses recommandations qui m'ont aidé à prendre du recul sur le contenu de ce mémoire et sa structure. Je tiens à lui exprimer toute ma reconnaissance.
- Améziane Aoussat, professeur à l'ENSAM – Paris, pour ses encouragements et l'esprit constructif avec lequel il a commenté et critiqué la synthèse présentée.
- Bernard Grabot, professeur à l'ENIT – Tarbes, pour le soutien valorisant qu'il peut apporter aux travaux menés sur le thème des compétences, que ce soit au sein du GT C2EI ou que ce soit ici pour l'évaluation de ce mémoire. Je lui exprime toute ma gratitude pour sa disponibilité et la qualité des relations scientifiques et humaines qu'il sait entretenir.

Mes remerciements vont aussi à Gérard Morel, professeur à l'Université Henri Poincaré – Nancy 1, qui m'a fait l'honneur de faire partie du jury et ensuite d'en être le Président. Son expertise scientifique et son implication au niveau national dans l'Association Française de l'Ingénierie Système permettent à ce domaine de progresser dans les activités de recherche.

Je remercie vivement les examinateurs, qui ont accepté d'évaluer ces travaux :

- Emmanuel Caillaud, professeur à l'Université Louis Pasteur - Strasbourg 1, avec qui j'ai eu le plaisir de co-animer le GT C2EI du GDR MACS. Ses critiques sont toujours constructives.
- Dominique Loise, Directeur du pôle Analyse Fonctionnelle, Sécurité de fonctionnement et Processus de développement du GMP, de PSA Peugeot Citroën. C'est un honneur et une chance de pouvoir travailler avec un tel expert sur des problématiques relevant de l'ingénierie système. Il nous donne accès à un terrain de recherche très fécond relatif à la conception fonctionnelle d'un GMP et à la collaboration multi-métiers.

Je tiens à remercier sincèrement les doctorants (ou docteurs) avec lesquels j'ai collaboré et dont les contributions m'ont permis d'avancer vers l'habilitation à diriger des recherches : Blaise Mtopi, Farouk Belkadi, Ghassen Harmel et Onanong Hlaoittinun.

Le projet de recherche avec PSA Peugeot Citroën m'a offert l'opportunité de découvrir le monde automobile et surtout de rencontrer de nombreux ingénieurs et techniciens, motivés par l'envie de concevoir une LAS ou un GMP au meilleur niveau mondial, mais aussi ouverts et disponibles lorsque nous les avons sollicités. Qu'ils soient tous remerciés sincèrement. Ils ont ainsi contribué à la réussite de ce projet et m'ont aidé à mieux comprendre les activités d'architecte système.

Un grand merci, en particulier, au Directeur des Plateformes et des Métiers Organes, Norbert Lartigue, qui a été le commanditaire du projet. Pendant les réunions du comité de pilotage, il nous a fait partager sa vision stratégique et ses principes de structuration d'un système de conception de 4500 personnes.



Je tiens à exprimer toute ma gratitude à de nombreux amis, sans qui ce travail n'aurait pas été possible ou agréable.

A Maryvonne Dulmet, collègue en recherche comme en enseignement, avec qui j'ai collaboré au cours de toutes ces années. Elle m'a donné la possibilité de co-encadrer quatre doctorants et a contribué à la construction de mon cheminement scientifique. Je lui suis très reconnaissant pour son soutien amical permanent.

A Jean-Pierre Micaëlli avec qui je collabore depuis maintenant cinq années. Nos nombreuses réunions de travail, ainsi que les entretiens communs au sein de PSA, ont permis des échanges fructueux, pluridisciplinaires. Je tiens à le remercier sincèrement pour ses qualités scientifiques et humaines, ainsi que pour son aide et ses conseils dans la rédaction de ce mémoire. Il m'a aussi permis de rencontrer des collègues de l'UTBM, devenus des amis, avec lesquels les collaborations ont été riches et agréables : Samuel Deniaud, Nathalie Kroichvili et Fabienne Picard.

A Christophe Perrard et Soukalo Dembélé, mes collègues de bureau pour la bonne ambiance de travail qu'ils me font partager et pour leur sympathie habituelle.

A Brigitte Morello et Jean Renaud pour la qualité de nos nombreux échanges scientifiques et amicaux. La rédaction de l'ouvrage sur le retour d'expériences nous a permis de nous rapprocher sur les plans professionnel et personnel.

A Jean-Michel Henrioud et Philippe Lutz pour les relations amicales que nous entretenons. En particulier, un merci à Philippe pour son aide sur une perspective liée à l'ingénierie des systèmes micro-mécatroniques.

A François Lhote et Annie Beretti, qui ont été à l'initiative du projet de recherche avec PSA. Ils m'ont aidé à construire le projet et à le conduire, à mes débuts. Leurs conseils expérimentés ont beaucoup contribué à ma progression scientifique dans le domaine du pilotage des compétences et de l'approche système. Je leur suis très reconnaissant pour cette aide et pour leurs encouragements amicaux.

A Alain Bernard, professeur à l'Ecole Centrale de Nantes pour ses encouragements dans la phase de préparation de l'HDR et pour son soutien lorsque j'ai eu besoin de son expertise scientifique.

Un remerciement particulier et personnel à : Olivier Boucher, Stéphane Chrétien, Bernard Yannou, Jean-Pierre Bourey, Benoît Eynard, Jean-Paul Kieffer, François Vernadat, et autres collègues participant aux GTs C2EI ou IS3C, pour leurs aides ou encouragements en recherche.

Je tiens à exprimer des remerciements chaleureux à tout le personnel du département AS2M et de mon service d'enseignement (le Groupe Automatique et Productique) à l'UFR Sciences et Techniques, pour la bonne ambiance de travail et les relations cordiales qui sont entretenues au sein de nos structures. Un merci particulier à Maurice, Martine, Isabelle, Sandrine, Sylvie (à l'IPV), Mariette (à la scolarité) et Bernard (à l'imprimerie) pour leur sympathie et leur aide administrative ou logistique. Un grand merci aussi à l'équipe pédagogique de la MST ATIBA : Rémy Leloup, David Guibert, Sébastien Duffour, Isabelle Perret, Jean-Claude Pont, André Gogneau ... ainsi que tous les anciens étudiants d'ATIBA pour leur témoignage de sympathie. Les sept années de responsabilité d'ATIBA ont été passionnantes.

Une profonde reconnaissance va à mes parents pour m'avoir transmis des valeurs essentielles, comme l'amour, l'amitié, le respect, le travail ... et qui m'ont soutenu au mieux dans la poursuite de mes études jusqu'au doctorat. Un grand merci aussi à toute ma famille et belle-famille pour les moments chaleureux que nous pouvons partager ensemble. Une reconnaissance particulière à Claudette et Paul, mes beaux-parents, pour leur soutien.

Enfin, un grand merci, plein d'affection, à mon épouse pour son soutien dans le parcours parfois difficile qui mène à l'HDR et à mes deux enfants pour le bonheur qu'ils me procurent au quotidien.

# Sommaire

---

<b>PARTIE I. SYNTHÈSE DE NOS ACTIVITÉS DE RECHERCHE, D'ANIMATION SCIENTIFIQUE ET D'ENSEIGNEMENT .....</b>	<b>13</b>
1. <i>Curriculum vitae</i> .....	14
1.1. Etat civil .....	14
1.2. Laboratoire de recherche et école doctorale .....	14
1.3. Diplômes universitaires.....	14
1.4. Fonctions universitaires.....	15
1.5. Activités et collaborations industrielles.....	15
1.6. Formations suivies.....	15
2. <i>Cadre du parcours professionnel</i> .....	16
3. <i>Résumé de notre thèse de doctorat (1993-1996)</i> .....	17
4. <i>Synthèse de nos travaux de 1998 à 2008</i> .....	18
4.1. Problématique .....	18
4.2. Terrains d'analyse et d'expérimentation .....	20
4.3. Synthèse des résultats de recherche.....	21
5. <i>Animation et encadrement de la recherche</i> .....	23
5.1. Obtention et gestion de contrats de recherche. ....	23
5.2. Animations et collaborations scientifiques.....	23
5.3. Activités de relecture et d'évaluation.....	25
5.4. Co-encadrement de thèse.....	26
5.5. Autres activités d'encadrement .....	27
6. <i>Responsabilités pédagogiques</i> .....	28
6.1. Rédaction de programmes pédagogiques .....	28
6.2. Recrutement et devenir des étudiants .....	29
6.3. Gestion du personnel.....	29
6.4. Communications extérieures et valorisation.....	30
7. <i>Activités d'enseignement</i> .....	31
7.1. Synthèse des enseignements réalisés en tant que moniteur et ATER de 1993 à 1998.....	31
7.2. Synthèse des enseignements en tant que Maître de Conférences .....	31
 <b>PARTIE II. PRODUCTION SCIENTIFIQUE .....</b>	 <b>35</b>
1. <i>Publications en revues avec comité de lecture</i> .....	35
2. <i>Contributions à ouvrage</i> .....	35
3. <i>Co-édition de numéro spécial ou ouvrage</i> .....	36
4. <i>Liste des communications</i> .....	36
4.1. Communication à des colloques internationaux, avec comité de lecture et actes .....	36
4.2. Communication à des colloques nationaux, avec comité de lecture et actes .....	38
4.3. Communications diverses.....	39
5. <i>Rapports de contrats de recherche</i> .....	39
6. <i>Rapport d'activité collective</i> .....	40
 <b>PARTIE III. CONTRIBUTIONS A L'INSTRUMENTATION DU METIER D'ARCHITECTE SYSTEME : DE L'ARCHITECTURE MODULAIRE DU PRODUIT A L'ORGANISATION DU SYSTEME DE CONCEPTION - POSITIONNEMENT ET PROBLEMATIQUE .....</b>	 <b>41</b>
CHAPITRE 1. UNE ACTIVITE DE CONCEPTION EN MUTATION.....	42
1.1. Complexification des exigences de conception .....	42
1.2. Complexification des systèmes mécatroniques .....	42
1.3. Complexification des modèles, méthodes et outils d'aide à la conception.....	43
1.4. Complexification des organisations et des modes de pilotage.....	46
1.5. Une réponse globale : l'Ingénierie Système (IS).....	48
1.6. Premier positionnement de notre projet.....	49
CHAPITRE 2. UNE STRUCTURATION DE LA RECHERCHE EN CONCEPTION .....	50
2.1. Recherche sur la conception de produit.....	51
2.2. Recherche sur le pilotage des activités de conception .....	53
2.3. Recherche sur l'évaluation de performance .....	55
2.4. Second positionnement de notre projet.....	55

CHAPITRE 3.	UN PROJET D'INSTRUMENTATION DU METIER D'ARCHITECTE SYSTEME .....	56
3.1.	Une activité métier : identifier l'architecture du système.....	57
3.2.	Une activité organisationnelle : concevoir l'organisation du système de conception.....	58
3.3.	Positionnement international et national de notre recherche .....	59
3.4.	Conclusion sur le positionnement de notre recherche .....	63
<b>PARTIE IV.</b>	<b>CONTRIBUTIONS A L'ARCHITECTURE MODULAIRE DU PRODUIT .....</b>	<b>65</b>
CHAPITRE 4.	FONDEMENTS DE L'ARCHITECTURE MODULAIRE D'UN SYSTEME .....	66
4.1.	Introduction.....	66
4.2.	L'approche système.....	66
4.3.	Etat de l'art sur la conception modulaire .....	70
4.4.	Etat de l'art sur la conception de famille de produits.....	79
4.5.	Synthèse .....	81
CHAPITRE 5.	CONTRIBUTIONS A L'ARCHITECTURE MODULAIRE DU PRODUIT .....	83
5.1.	Introduction.....	83
5.2.	Amélioration d'un algorithme de clustering .....	84
5.3.	Propagation des choix d'architecture d'un domaine sur l'architecture d'un autre domaine .....	90
5.4.	Contribution à la modélisation de l'architecture d'une famille de produits et de génération des variantes .....	99
5.5.	Bilan et perspectives .....	104
<b>PARTIE V.</b>	<b>CONTRIBUTIONS A L'ORGANISATION DU SYSTEME DE CONCEPTION .....</b>	<b>109</b>
CHAPITRE 6.	FONDEMENTS DE L'ORGANISATION DU SYSTEME DE CONCEPTION.....	110
6.1.	Introduction.....	110
6.2.	Définition d'un système de conception.....	110
6.3.	Concept d'organisation .....	111
6.4.	Sur l'architecture de l'organisation d'un projet .....	112
6.5.	Sur la constitution d'équipes .....	113
6.6.	Sur le pilotage des systèmes de compétences.....	116
6.7.	Analyse des activités de conception et de leur pilotage .....	118
6.8.	Synthèse .....	122
CHAPITRE 7.	CONTRIBUTION A L'ORGANISATION DU SYSTEME DE CONCEPTION .....	123
7.1.	Introduction.....	123
7.2.	Contribution au pilotage du système de conception en IS.....	124
7.3.	Contribution à la caractérisation d'une compétence en conception .....	131
7.4.	Contribution à la constitution d'équipes compétentes .....	134
7.5.	Extension des DSM pour structurer les Métiers de la conception .....	137
7.6.	Contribution à la qualification et au déploiement d'une compétence stratégique en conception.....	139
7.7.	Bilan et perspectives .....	142
<b>PARTIE VI.</b>	<b>RESULTATS RECENTS ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>147</b>
CHAPITRE 8.	VERS LE COUPLAGE ENTRE L'ARCHITECTURE DU PRODUIT ET L'ORGANISATION DU PROJET .....	148
8.1.	Introduction.....	148
8.2.	Une méthode de co-évolution entre l'architecture du produit et l'organisation du projet de conception.....	149
8.3.	Une méthode d'optimisation de l'organisation de la conception.....	152
8.4.	Synthèse .....	157
CHAPITRE 9.	PERSPECTIVES.....	158
9.1.	Synthèse des contributions.....	158
9.2.	Vers une conception collaborative "consciente" .....	159
9.3.	Vers une performance durable du système de conception.....	161
9.4.	Vers un système agile de systèmes de conception .....	162
9.5.	Vers une ingénierie de systèmes micro-mécatroniques.....	165
<b>PARTIE VII.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>167</b>
	LISTE DES FIGURES .....	178
	LISTE DES TABLEAUX .....	180
	RESUME .....	182

<b>PARTIE VIII. ANNEXES .....</b>	<b>183</b>
ANNEXE 1. CARTOGRAPHIE DES PRINCIPAUX LABORATOIRES DE RECHERCHE TRAVAILLANT SUR L'ARCHITECTURE MODULAIRE D'UN PRODUIT .....	185
ANNEXE 2. PARTICULARITES DE LA CONCEPTION DES ORGANES AUTOMOBILES .....	186
ANNEXE 3. ANALYSE DE SENSIBILITE DE LA METHODE DE PROPAGATION .....	188
ANNEXE 4. DEFINITIONS DE CONCEPTS CLES POUR LA MODELISATION DES ACTIVITES DE CONCEPTION .....	191
ANNEXE 5. [R.5] .....	195
ANNEXE 6. [R.7] .....	197
ANNEXE 7. [R.8] .....	199
ANNEXE 8. [R.10] .....	201
ANNEXE 9. [R.11] .....	203

# Notations et abréviations

AS2M	Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques
ATIBA (MST)	Arts et Techniques Industrielles du Bois et de l'Ameublement
A2P-NUM	Architecture Process-Produit dans un environnement collaboratif et NUMérique
AFIS	Association Française de l'Ingénierie Système
ATER	Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche
BDT	Base de Données Techniques
C2EI	Connaissances et de Compétences dans les Entreprises Industrielles (modélisation et pilotage des systèmes de ...)
CSP (GT)	Conception des Systèmes de Production
DEA	Diplôme d'Etudes Approfondies (devenu la deuxième année du master)
DMM	Domain Mapping Matrix
DPMO	Direction des Plateformes et des Métiers techniques Organes
DSM	Design Structure Matrix
GDR MACS	Groupe De Recherche sur la Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes dynamiques
GMP	Groupe Moto-Propulseur
GPAO	Gestion de Production Assistée par Ordinateur
GT	Groupe de Travail
IS	Ingénierie Système
IS3C (GT)	Ingénierie des Systèmes de Conception et Conduite du Cycle de vie
JEM STIC	Jeune Equipe Mobilité Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication
LAS	Liaison Au Sol
LMD	Licence, Master, Doctorat
M3M	Mécatronique - Méthodes, Modèles, Métiers (Laboratoire de l'UTBM)
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MdC	Maître de Conférences
MST	Maîtrise de Sciences et Techniques
RECITS	REcherche sur les Choix Industriels, Technologiques et Scientifiques (Laboratoire de l'UTBM)
STIC	Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication
SysML	Systems Modeling Language
UE	Unité d'Enseignement
UML	Unified Modeling Language
UTBM	Université de Technologie de Belfort-Montbéliard



## **Partie I. Synthèse de nos activités de recherche, d'animation scientifique et d'enseignement**

L'objet de cette partie est de retracer notre parcours professionnel depuis 1993, année de notre première inscription en thèse de doctorat et de la prise en charge de nos premiers enseignements.

Nous présentons une synthèse de nos travaux de recherche, de nos activités d'animation et d'encadrement de la recherche et enfin, une synthèse des enseignements que nous avons réalisés.

## 1. CURRICULUM VITAE

### 1.1. *Etat civil*

Eric BONJOUR

Né le 16 septembre 1970 à Besançon

Nationalité française, marié, deux enfants.

Adresse professionnelle : Institut FEMTO-ST / Département AS2M<sup>3</sup>

UMR CNRS 6174 / ENSMM / Université de Franche-Comté / UTBM

24 rue Alain Savary, 25000 Besançon

Tél. : 03 81 40 27 98 – GSM : 06 72 77 63 52 - Fax : 03 81 40 28 09

Courriel : [ebonjour@ens2m.fr](mailto:ebonjour@ens2m.fr)

Fonction actuelle : Maître de Conférences à l'Université de Franche-Comté  
classe normale, PEDR 2008-2011

Section du CNU : 61<sup>ème</sup>



### 1.2. *Laboratoire de recherche et école doctorale*

Laboratoire de rattachement : Institut FEMTO-ST / Département AS2M<sup>4</sup>

Directeur : Professeur Michel De Labachellerie

Tél : 03.81.85.39.97 – Mél : [labachel@femto-st.fr](mailto:labachel@femto-st.fr)

Ecole doctorale : SPIM : Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques

Directeur : Professeur Eric LANTZ

Tél : 03 81 66 69 78 – Mél : [elantz@univ-fcomte.fr](mailto:elantz@univ-fcomte.fr)

Adresse : UFR ST 16 route de Gray 25 030 BESANCON Cedex

### 1.3. *Diplômes universitaires*

1991 Licence Mécanique, mention Bien, à l'Université de Franche-Comté

1992 Maîtrise de Mécanique, mention Bien, à l'Université de Franche-Comté

1993 Ingénieur ENSMM (Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et de Microtechniques, Besançon)

1993 DEA Informatique, Automatique et Productique, mention Bien, à l'ENSMM (thème : "Dimensionnement des tableaux Kanban en multi-produits")

1996 Doctorat spécialité Automatique et Informatique préparé au sein du LAB, thèse soutenue le 20 décembre 1996 - Mention : Très honorable

---

<sup>3</sup> Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques. Directeur du département: Professeur Nicolas CHAILLET

<sup>4</sup> De septembre 1998 à décembre 2007, notre laboratoire de rattachement était le Laboratoire d'Automatique de Besançon (LAB). Le LAB a intégré l'Institut FEMTO-ST au 1er janvier 2008, devenant ainsi le département AS2M.



Titre : " La qualité et la mise à jour des Bases de Données Techniques (BDT) utilisées en GPAO " - Dir. de thèse : Prof. P. Baptiste, actuellement Professeur à l'Ecole Polytechnique de Montréal (pierre.baptiste@polymtl.ca)

Jury : Prof. J.P. Campagne (rapporteur), Prof. G. Javel (rapporteur), G. Bel, Prof. A. Bourjault (Président), Prof. F. Lhote, G. Rech (Dir. Tech. Sté SOCOP, 25), C. Tacquard

#### *1.4. Fonctions universitaires*

- 93-96 Moniteur à la Faculté des Sciences et Techniques et à l'ENSM (Besançon) et allocataire de recherche au LAB (allocation de type MESR).
- 96-98 ATER à l'IUT Belfort-Montbéliard, Département Génie des Télécommunications et Réseaux (GTR), puis Département Organisation et Génie de la Production (OGP).
- 98-... Maître de Conférences au sein de l'Université de Franche-Comté.
- 98-05 Responsable de formation : de la MST ATIBA<sup>5</sup> jusqu'en 2004 puis Master Ingénierie Système appliquée à l'ameublement et la construction bois jusqu'en 2005.

#### *1.5. Activités et collaborations industrielles*

- 1994 Audit de la Base de Données Techniques (BDT) de la société SOCOP Industries à Besançon (20 jours d'intervention) – [Ra.1]
- 1995 Audit de la gestion de production de la société RICAL à Dijon (20 jours, 10k€) – [Ra.2]
- 1996 Audit de l'utilisation des BDT utilisées en GPAO dans la société A2C à Saint-Vit (6 jours d'intervention) et dans la société RIVEX à Ornans (6 jours d'intervention)
- 98-07 Encadrement de 20 apprentis, de 30 stagiaires et de 15 projets industriels dans les formations MST ATIBA, DESS Productique Appliquée puis après le LMD, dans le master Ingénierie Système et le master mécatronique. Entreprises concernées : Sanijura (39), Parisot Meubles (70), Cuisines Schmidt (68), Cuisines Legrand (25), Cuisines Arthur Bonnet (85), Ateliers Devillers (25), Ets Cari (54), Syneco (25), Myotte-Duquet (25) Adeco Agencement (25), Grizard Agencement (42), Marotte SA (39), Vilac (39) ...
- 99-06 Analyse de l'activité de managers et d'ingénieurs – chef de projet du contrat de recherche avec PSA (voir partie 6.1.) – budget total : 274 k€ – environ 100 jours d'intervention personnelle sur les sites de La Garenne-Colombes et Vélizy.

#### *1.6. Formations suivies*

Depuis notre recrutement au sein de l'Université de Franche-Comté, nous avons suivi les formations suivantes :

- Préparation à la conférence en Anglais au Centre de Langues Appliquées (en 1999 et 2000)
- Pratiques du management (en 2001 et 2002)
- Initiation à la programmation C++ et design pattern (en 2005)

---

<sup>5</sup> Maîtrise de Sciences et Techniques "Art et Techniques Industrielles du Bois et de l'Ameublement "

## 2. CADRE DU PARCOURS PROFESSIONNEL

Nous avons été nommé maître de conférences à l'Université de Franche-Comté en septembre 1998, pour renforcer la thématique "conception intégrée" constituée d'une part, d'une équipe "assemblage et désassemblage" et d'autre part, d'une équipe "Interactions sociotechniques en conception et production intégrée", amenée à disparaître après le départ en retraite du Professeur F. Lhote qui l'animait.

Suite à une sollicitation forte d'une Direction du Groupe PSA Peugeot Citroën chargée de la conception des GMP et des LAS<sup>6</sup> (PSA/DPMO<sup>7</sup>), nous avons participé, dès 1999, à la création d'une équipe-projet, chargée d'apporter une réponse pluridisciplinaire à une problématique de recherche concernant la modélisation et le pilotage des "activités et compétences de conception". A son origine, cette équipe était constituée de deux MdC 61ème section (Maryvonne Dulmet et moi-même), un docteur en psychologie cognitive (G. Mercier) et un doctorant en Sciences de gestion. Elle a été labellisée "JEM STIC CNRS"<sup>8</sup> entre 2001 et 2002.

Dans le rôle de chef de projet que nous avons assuré de 1999 à 2006, nous avons défini, dès l'origine du projet, un plan de recherche comportant quatre phases successives, chacune avec trois revues de projet (engagement sur acceptation du cahier des charges de la recherche, synthèse intermédiaire et bilan) donnant lieu à autant de reportings auprès du Comité de pilotage. Ainsi, nous avons rédigé douze rapports [Ra.4-15]). Depuis 1999, nous avons passé environ 100 jours sur site. Le budget global du projet a été de 274 k€, dont 204k€ revenant au LAB. Ce financement nous a permis de financer les allocations de recherche de quatre doctorants, dans le cadre de bourse EGIDE<sup>9</sup>, en liens étroits ou directs avec ce projet.

Au début de chaque phase, nous avons recherché des collaborations permettant d'adapter nos compétences à l'évolution de la problématique de recherche. Ainsi, nous avons élargi cette équipe en 2002 en collaborant avec deux enseignants-chercheurs en psychologie cognitive du CNAM de Paris, P. Pastré et P. Béguin, et un maître de conférences en sciences de gestion de l'UTBM, JP Micaelli. Cette équipe a évolué jusqu'en 2006 autour d'un "noyau dur", constitué de JP Micaelli, M. Dulmet et moi-même, avec la collaboration, lors de la phase 4, de deux maîtres de conférences en sciences économiques de l'UTBM-RECITS (N. Kroichvili, F. Picard).

Par ailleurs, concernant les quatre thèses que nous avons co-encadrées, nous avons participé activement à la rédaction du sujet, aux orientations scientifiques et à l'accompagnement du doctorant sur un terrain d'expérimentation, ce qui justifie un taux d'encadrement supérieur à 60% pour trois d'entre elles. La première thèse que nous avons co-encadrée a débuté en septembre 2002 et la première soutenance de thèse a eu lieu en juillet 2006.

Depuis notre nomination en 1998 et jusqu'en 2004, nous avons assumé la responsabilité d'une formation à l'UFR Sciences et Techniques de type MST (Bac+3-Bac+4) formant des étudiants à la conception industrielle de produits bois. Dans le cadre de la réforme du LMD en 2003 et en collaboration avec des représentants industriels et l'équipe pédagogique, nous avons transformé cette formation en master Ingénierie Système, avec des applications sur les produits bois.

---

<sup>6</sup> Le Groupe Moto-Propulseur (GMP) correspond principalement au moteur, à la boîte de vitesse et à la transmission. La Liaison Au Sol (LAS) correspond au châssis : trains avant et arrière, systèmes de direction, de freinage, de suspension...

<sup>7</sup> D'abord, DOGN : Direction des Organes jusqu'en 2003 qui est devenue, suite à une restructuration, DPMO : Direction des Plateformes et des Métiers techniques Organes. Il s'agit d'une entité d'environ 4 400 personnes, ce qui en fait l'un des cinq premiers bureaux d'études intégrés de France.

<sup>8</sup> Jeune Equipe Mobilité Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication.

<sup>9</sup> Financement de 136 mois de thèse (soit 24 mois, 36 mois, 40 mois et 36 mois) à 1280€, charge comprise, soit 1000€ net par mois. Soit 174 k€. Le détail de notre co-encadrement de thèse sera fourni en section 5.4, p.26.

En synthèse, notre nomination à un poste de maître de conférences s'est traduite par :

- un changement de thématique de recherche par rapport à nos travaux de doctorat,
- la responsabilité d'un projet de recherche qui a occupé une forte place dans nos activités de recherche entre 1999 et 2006, et
- la responsabilité d'une formation professionnelle entre 1998 et 2005, qui a été accompagnée d'un volume horaire d'enseignement conséquent (environ 300 hEqTD).

En juin 2005, un collègue a accepté de reprendre cette responsabilité pédagogique, ce qui nous a permis de dégager plus de temps pour accentuer nos efforts en recherche et pour "capitaliser" sur les résultats obtenus (soumission de plusieurs articles et communications). Enfin, nous avons obtenu un semestre pour congé de recherche (CRCT) au sein de l'Université de Franche-Comté de février 2007 à août 2007 (demi-service sur 2006-2007).

### **3. RESUME DE NOTRE THESE DE DOCTORAT (1993-1996)**

Ce travail s'était appuyé sur l'analyse des Bases de Données Techniques (BDT) de quatre entreprises de la Région de Franche-Comté. Elles connaissaient le même souci avec la qualité de leurs données techniques. Nous avons constaté que, consciemment ou non, ces entreprises ne remettaient pas régulièrement à jour leur BDT. Sans politique réfléchie de maintenance des données, la mise à jour était souvent oubliée et la qualité des données se dégradait progressivement. Les entreprises avaient alors besoin de faire le point sur la qualité de leur BDT. Cette problématique était (et est encore !) certainement généralisable à d'autres entreprises. Pour apporter une réponse à ces problèmes, nous avons travaillé sur quatre points importants : une terminologie sur les dimensions de la qualité des données, une analyse de la qualité des données sur les BDT, une étude des corrélations entre la qualité des données en entrée et les résultats d'algorithmes et enfin, une démarche d'évaluation et d'amélioration de la qualité des données techniques. La principale conclusion de nos travaux a été la suivante : même s'il est évident que l'exactitude des données influe sur les résultats des systèmes de GPAO, une très bonne exactitude n'est pas indispensable. Ceci nous a amené à réfléchir sur le niveau de détail des modèles que nous développons pour les applications informatiques de la gestion de production, ainsi que sur le degré de complexité des modèles conceptuels que nous introduisons en entreprise.

Ces travaux ont été valorisés par deux articles, l'un dans la revue "Journal Européen des Systèmes Automatisés" [R.1] et l'autre dans la revue "Journal of Decision Systems", [R.2].

[R.1] E. Bonjour, P. Baptiste, "A trade-off between data quality and updating costs in scheduling databases", APII-JESA, Vol. 32, N°4, juin 1998, pp. 467-486.

[R.2] E. Bonjour, P. Baptiste, "Improving the quality of manufacturing databases used in CAPM", Journal of Decision Systems, Vol. 9, N°1, 2000, pp. 55-76.

## 4. SYNTHÈSE DE NOS TRAVAUX DE 1998 A 2008

Dans cette partie, nous présentons d'abord la problématique scientifique et les thématiques traitées. Ensuite nous positionnons cette problématique aux niveaux national et international. Nous décrivons brièvement les terrains d'analyse et d'expérimentation dont nous avons pu bénéficier. Nous faisons enfin une synthèse de nos contributions avec les publications correspondantes.

### 4.1. Problématique

Depuis une dizaine d'années, les concepteurs de systèmes mécatroniques<sup>10</sup> doivent satisfaire des exigences de plus en plus sévères et nombreuses. Celles-ci proviennent de différentes parties prenantes ("*stakeholders*"), intervenant sur tout le cycle de vie du système désiré (comme les clients, le service maintenance, les réglementations, ...). Les concepteurs doivent créer des solutions qui tendent à se complexifier, pour porter de multiples fonctions de service ou intégrer les dernières technologies innovantes.

La conception d'un système mécatronique passe par la conception architecturale qui réalise l'identification de l'architecture du système. Cette activité s'intercale entre la spécification des exigences (vue fonctionnelle) et la conception détaillée de ses constituants (vue organique). Identifier une architecture revient à subdiviser le système en différents sous-systèmes inter-reliés, et à préparer leur intégration. Il faut donc manipuler à la fois une vue fonctionnelle et une vue organique du système (Figure 2, inspirée de [Meinadier, 2002]).

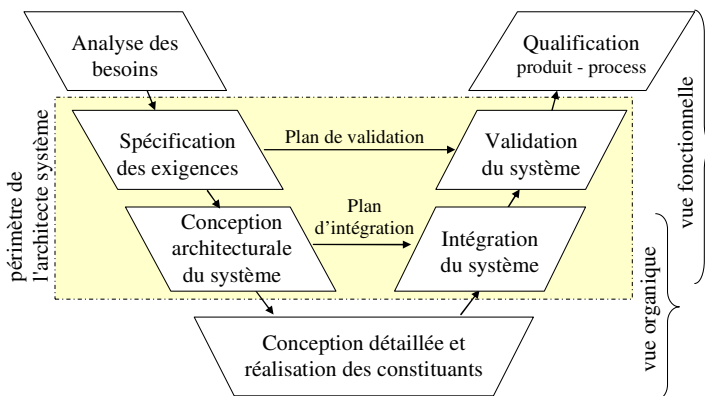


Figure 2: Positionnement de la conception architecturale

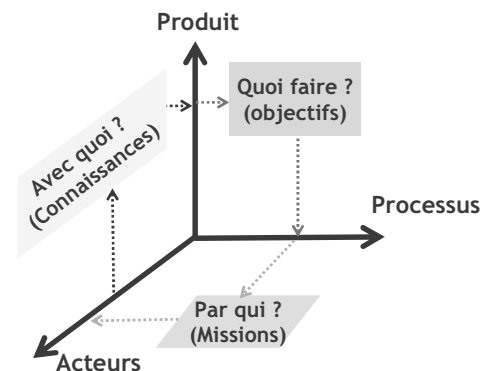


Figure 3: Les domaines du projet

Cette activité requiert l'implication d'un métier qui devient de plus en plus important : l' "architecte système". Nightingale [2000] et Eppinger et Salminen [2001] ont mis en évidence qu'un projet de conception de produit repose sur trois domaines fortement inter-reliés : le produit, le processus et les acteurs de conception (Figure 3).

**En même temps que l'ingénierie technique, l'architecte système doit assurer l'ingénierie organisationnelle du projet**, c'est-à-dire, concevoir une organisation<sup>11</sup> adéquate du projet de conception. Organiser le projet de conception revient à définir les processus, les responsabilités de chaque acteur de conception<sup>12</sup>, en termes de missions et de liens hiérarchiques, ainsi que les

<sup>10</sup> Certains auteurs parlent d' "artefact" [Simon, 1997] [Micaëlli et Forest, 2003], pour désigner tout système conçu et agencé intentionnellement pour répondre à un besoin précis. Le monde qui nous entoure est ainsi constitué de très nombreux artefacts. Par exemple, un produit, une usine, une base de données, un service Recherche&Développement, un laboratoire ...

<sup>11</sup> Le terme "organisation" a de multiples significations : l'action d'organiser un système, le résultat de l'organisation, une entité "entière" comme une entreprise ou une association, ...

<sup>12</sup> Nous utiliserons le terme "acteur" pour désigner soit une entité organisationnelle ou une équipe (acteur collectif) soit un concepteur (acteur individuel).

procédures de communication. Un acteur a la responsabilité de réaliser une (ou plusieurs) activité(s) du projet qui contribue(nt) à la conception justifiée du produit.

La finalité de nos travaux est de **développer des modèles, méthodes et outils d'aide à la décision permettant de supporter les activités à la fois technique et organisationnelle d'un architecte système.**

Ce double rôle est critique lors de la phase de conception préliminaire, car les décisions prises auront un impact fort sur les performances de l'ensemble du projet. Il s'agit d'une fonction émergente et stratégique dans des secteurs industriels importants, comme l'aéronautique, l'automobile, les télécom, les machines spéciales, voire les industries microtechniques.

Lorsqu'une entreprise prend la décision stratégique de lancer un projet de conception d'un nouveau produit ou d'une nouvelle famille de produits (un GMP hybride ou une LAS, par exemple), il lui faut alors initier un véritable projet d'architecture système. Le concepteur, aguerri, responsable d'un tel projet doit à la fois **identifier (ou faire évoluer) une architecture du produit** et, en même temps, **concevoir l'organisation du projet** (découpage du projet en équipes, pilotage des compétences), de sorte à le rendre performant.

L'analyse de l'état de l'art montrera qu'il existe un manque d'outil ou de méthode, permettant d'aider l'architecte dans cette double activité. Notre recherche vise donc à lever ce verrou et s'intitule : **"Contributions à l'instrumentation du métier d'architecte système : de l'architecture modulaire du produit à l'organisation du système de conception"**.

Afin de préciser ce verrou, la Figure 4 présente une cartographie de nos thématiques de recherche et positionne les travaux de thèse que nous avons co-encadrés.

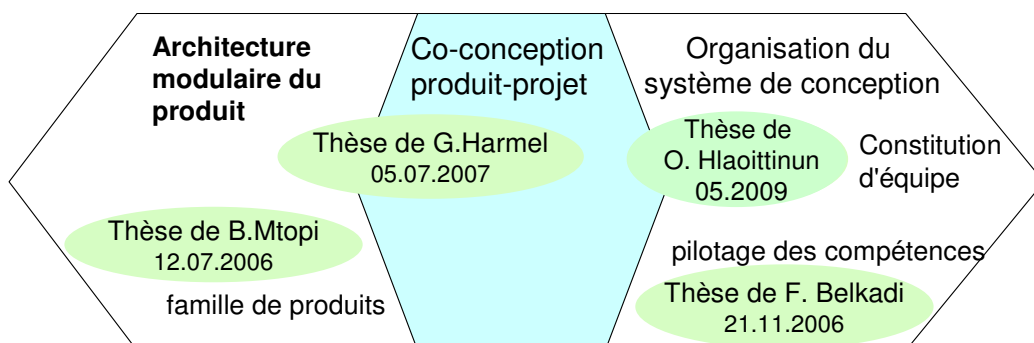


Figure 4: Cartographie de nos travaux de recherche

Nos contributions à chaque thématique répondent aux questions suivantes<sup>13</sup> :

- T1 - Identification d'une architecture modulaire du produit : comment identifier une architecture modulaire ? Comment modéliser l'architecture d'une famille de produits ?
- T2 - Organisation du système de conception : comment constituer des équipes compétentes pour développer des systèmes mécatroniques ? Comment piloter les systèmes de compétences ?
- T3 - Co-conception des architectures produit-projet : comment architecturer conjointement le produit et l'organisation du système de conception ? Comment propager des évolutions des modules du produit vers l'organisation du système de conception ?

Ces thématiques seront précisées dans la Partie III, Chapitre 3, qui positionne notre recherche et présente son originalité. L'état de l'art sera détaillé dans les Chapitre 4 et Chapitre 6.

<sup>13</sup> Nous sommes conscients que d'autres questions de recherche peuvent correspondre à ces thématiques mais elles ne font pas l'objet de contribution.

## 4.2. Terrains d'analyse et d'expérimentation

Au cours de nos activités d'enseignement et de recherche, nous avons pu bénéficier de deux types de terrains d'analyse et d'expérimentation privilégiés : d'une part, un projet de recherche avec PSA Peugeot Citroën et d'autre part, les collaborations industrielles que nous avons entretenues dans le cadre de nos responsabilités pédagogiques avec des entreprises de l'ameublement et la construction bois.

Ces activités et collaborations nous ont permis, entre autres, **d'obtenir une bonne représentation des métiers qui génèrent les architectures des produits et qui pilotent les projets**, ainsi que des terrains d'expérimentation pour nos travaux de recherche, pour la conception de familles de cuisines intégrées (thèse de B. Mtopi), pour la caractérisation des compétences de concepteurs de meubles (thèse de F. Belkadi) et pour l'identification de l'architecture modulaire du produit et de l'organisation du projet (projet de recherche avec PSA).

Concernant l'ingénierie de systèmes complexes, l'analyse des besoins industriels a été approfondie dans le cadre du projet de recherche, impliquant d'une part, des chercheurs du LAB et de RECITS<sup>14</sup>, d'autre part, une Direction du Groupe PSA Peugeot Citroën, chargée de la conception des GMP et des LAS. Notre travail a nécessité de nombreux entretiens avec des architectes du système GMP, pour comprendre leurs activités et leurs besoins. Nous avons recueilli des données dans le cadre de projets de développement de nouveaux moteurs et boîtes de vitesse. Les architectes ont ensuite collaboré lors de l'interprétation et la validation de nos résultats de calcul.

Nous avons mené des entretiens avec des personnes occupant, par exemple, les fonctions suivantes : Directeur de Métiers de la conception, Responsable Cœur de Compétences, Père technique, Expert modélisation, Chef de projet, Pilote Produit-Process (PPP), Responsable Synthèse Prestations, Responsable Conception Système (RCS), Architecte Fonction Système (ARFS), Pilote Architecture Mécanique (PAM), Pilote Modélisation-Intégration-Validation (PMIV), Chargé de Projet Composant (CdP), Pilote Sûreté de Fonctionnement, Responsable Industrialisation, Chargé de projet d'innovation, Etc. Ceci nous a permis d'analyser à la fois le rôle de chaque concepteur mais aussi d'avoir une vue globale d'un projet de conception ou des interactions entre les Métiers.

---

<sup>14</sup> RECITS, Laboratoire de recherche sur les choix industriels, technologiques et scientifiques, EA 3897, UTBM, Sévenans (90)

### 4.3. Synthèse des résultats de recherche

Depuis notre nomination, nous avons co-encadré<sup>15</sup>, avec notre collègue Maryvonne Dulmet (MdC HdR), quatre thèses dont trois sont soutenues [Th1-3] et une est en cours [Th4]. Nous avons aussi encadré cinq étudiants en DEA ou Master Recherche [D1-5] au sein de l'Université de Franche-Comté.

Le Tableau 1 présente une synthèse de nos contributions scientifiques. Il précise aussi les publications majeures se rapportant à chaque thématique. Les principales contributions, que nous développerons dans ce mémoire, sont les suivantes :

➤ **T1 : Identification de l'architecture modulaire du produit :**

- L'amélioration d'un algorithme de *clustering*, qui ne fixe pas a priori le nombre de modules avec une densification des modules et l'identification d'éléments intégrateurs (utilisation de techniques d'optimisation ; tests sur des cas d'école et application sur des moteurs).
- Une méthode permettant de propager des choix d'architecture fonctionnelle sur l'architecture de composants (utilisation d'une modélisation matricielle, de la logique floue et d'un algorithme de *clustering* ; application sur un projet de conception d'un moteur diesel au sein de PSA / DPMO).
- Une méthode de modélisation de l'architecture d'une famille de produits et de génération des variantes (utilisation des grammaires de graphe ; application à la conception d'une famille de cuisine intégrée au sein de l'entreprise Cuisines Legrand, 25)

➤ **T2 : Conception de l'organisation du système de conception**

- Un cadre conceptuel pour le pilotage sociotechnique du système de conception en Ingénierie Système (utilisation du langage UML ; application au système de conception de DPMO)
- Une méthode de caractérisation d'une compétence en conception (utilisation de la logique floue et du langage UML ; application sur un projet de conception de meubles).
- Une méthode de constitution d'équipes compétentes pour développer des systèmes mécatroniques, (utilisation de matrices d'incidence et d'un algorithme de *clustering* ; application sur un cas d'école).
- Une extension des matrices DSM pour structurer les Métiers de la conception (utilisation de DSM connaissances ; application pour une aide à la structuration des acteurs de conception fonctionnelle du GMP au sein de PSA/DPMO).
- Un outil de qualification et de déploiement d'une compétence stratégique en conception (utilisation d'un arbre multicritère ; application sur la conception d'une boîte de vitesse robotisée).

➤ **T3 : Co-conception des architectures produit-projet**

- Une méthode de propagation de modifications entre l'architecture du produit et l'organisation du projet de conception (utilisation d'une modélisation matricielle, d'un traitement flou et d'une modélisation d'incertitudes ; application sur un projet de conception d'une boîte de vitesse robotisée au sein de PSA/DPMO).
- Une méthode d'optimisation du couplage entre les architectures de deux domaines liés par une matrice d'incidence (utilisation de techniques d'optimisation et de la toolbox d'optimisation de Matlab ; application à la fois dans le cas du couplage produit / projet et

---

<sup>15</sup> Les pourcentages de co-encadrement sont fournis dans la section 5.4 : Co-encadrement de thèse.

dans le cas du couplage fonctions / organes, à partir des données collectées au sein de PSA/DPMO).

Verrous		Outils de modélisation et de traitement utilisés	Production scientifique – contexte
T1 Identification de l'architecture modulaire du produit	Comment modéliser l'architecture d'une famille de produits ?	Grammaires de graphe	Thèse B. Mtopi : [Th1] [R.11] [CI. 12, 13, 14, 26] Conception d'une famille de meubles, Cuisines Legrand (25)
	Comment identifier une architecture modulaire ?	Matrices DSM et matrices d'incidence Algorithmes de <i>clustering</i> Techniques d'optimisation	Thèse G. Harmel : [Th3] [R7, R9] [Ch.1] [CI. 24, 25, 31, 32] Conception d'un moteur diesel EuroV et d'une boîte de vitesse robotisée 6 vitesses
	Comment co-architecturer le produit et le projet de conception ?		
T3 Co-conception des architectures produit-projet	Comment constituer des équipes compétentes pour développer des systèmes mécatroniques ?	Matrices d'incidence Algorithmes de <i>clustering</i> Techniques d'optimisation	Thèse O. Hlaouittinun : [Th4] En cours [R.8] [CI. 27-30]
T2 Conception de l'organisation du système de conception	Comment piloter les systèmes de compétences ?	Logique floue Langage UML	Thèse F. Belkadi : [Th2] [R.3, 4, 5, 6, 10] [Ch.2, Ch.3] [CI. 1-11, 15-23, 33] Projet de conception, Parisot Meubles (70). Projet de recherche avec PSA/DPMO

**Tableau 1 : Contributions scientifiques et contextes industriels**



## 5. ANIMATION ET ENCADREMENT DE LA RECHERCHE

Dans cette section, nous présentons nos activités de gestion de contrats de recherche, d'animations et collaborations scientifiques, de relecture et d'évaluation de travaux de recherche, et de co-encadrement de thèse.

### 5.1. *Obtention et gestion de contrats de recherche.*

Nous avons présenté, dans la section 2, notre rôle dans l'obtention et la gestion des quatre phases successives du contrat de recherche avec PSA / DPMO, nommé "activités et compétences de conception", chaque phase devant être validée avant d'engager la phase suivante :

- Phase de cadrage : février 1999 – novembre 1999 ; montant total : 70 kF (11 k€)
- Phase pilote : février 2001 – décembre 2001 ; montant total : 390 kF (60k€)
- Phase de développement : Autres partenaires : CNAM (Laboratoire d'Ergonomie), UTBM (Laboratoire M3M) ; octobre 2002 – décembre 2003 ; montant total : 103 k€ - part LAB : 63k€
- Phase d'extension de la recherche et applications : janvier 2005 – mai 2006 ; autre partenaire UTBM (Laboratoire Récits – 3 chercheurs en SHS) ; montant total : 100k€ - part LAB : 70k€

Dans le prolongement de ces travaux, et toujours en collaboration avec PSA Peugeot Citroën, nous avons participé au portage du projet A2P-NUM [Ra.16], qui a été labellisé par le pôle de compétitivité "Véhicule du Futur" en octobre 2006. Ce projet concerne les architectures du produit et de l'organisation d'un projet en conception de systèmes automobiles. Il implique principalement trois laboratoires : M3M et RECITS de l'UTBM, le département AS2M de FEMTO-ST. Une allocation de thèse a été accordée par la Région pour trois ans à M3M en octobre 2007 et PSA/DPMO va engager 20 k€ pour la période 2008-2009.

### 5.2. *Animations et collaborations scientifiques*

Cette section présente les animations et collaborations scientifiques que nous avons menées, au niveau régional, national et international.

#### 5.2.1. **Au niveau régional**

En 2001, nous avons co-rédigé une demande de labellisation d'une Jeune Equipe Mobilité STIC CNRS (JEM STIC), avec notre collègue Maryvonne Dulmet. Le projet s'intitulait : "Modélisation et Pilotage des Systèmes de Compétence d'Ingénierie" et reposait sur une équipe pluridisciplinaire (dont un Docteur en psychologie cognitive, un Doctorant en Sciences de Gestion) et une collaboration avec un partenaire industriel, PSA Peugeot Citroën. Nous avons obtenu ce label du 01-10-2001 au 30-09-2002 [Ra.9].

Depuis 2002, nous avons mené deux collaborations avec des laboratoires de l'UTBM :

- la première collaboration s'est déroulée dans le cadre du contrat de recherche avec PSA Peugeot Citroën, entre 2003 et 2006. Elle a impliqué trois collègues en SHS : JP. Micaëlli, MdC 6è section CNU, N. Kroichvili et F. Picard, MdC 7è section (laboratoire RECITS) ;
- la seconde se déroule dans le cadre du projet A2P-NUM, débuté en 2006. Elle implique JP. Micaëlli, et S. Deniaud, MdC 60è section (laboratoire M3M).

Par ailleurs, nous avons organisé, à Besançon le 28 juin 2002, le 6<sup>ème</sup> séminaire du Groupe Gestion des Connaissances et des Compétences, "Vers l'intégration des compétences dans les systèmes de performance et dans la maîtrise des processus en entreprise".

Nous avons couplé ce séminaire avec une journée thématique de l'Institut de Productique, à destination des industriels, le 27 juin, sur les "intérêts et difficultés de la mise en œuvre d'une démarche compétences en entreprise".

En tant que vice-président du comité d'organisation, nous avons activement participé à l'organisation du Congrès International de Génie Industriel (CIGI) à Besançon en juin 2005. Nous avons sollicité des animateurs de différents GT du GDR MACS et réussi à susciter douze sessions spéciales sur le thème de leur GT (4 communications par session).

En parallèle aux sessions scientifiques, nous avons co-organisé deux sessions industrielles, l'une sur la "Gestion des compétences / organisation" (intervenants : D. Thomas, Délégué Régional de FACT / ANACT, G. Vallet, Chef de Projet à l'Institut de Productique et M. Meunier, Responsable Qualité SIMU) et l'autre, sur l' "Innovation / Conception" (intervenants : J.L. Perrard, Responsable Systèmes d'information Produit Process, PSA Peugeot Citroën, L. Giannoni, Responsable R&D KHOLER France, N. Loch, Ingénieur consultant ADEFI).

### 5.2.2. Aux niveaux national et international

Depuis 2001, nous avons participé à la création et à l'animation d'un groupe de travail sur le pilotage des compétences dans les entreprises industrielles. D'abord soutenu par le club des enseignants-chercheurs en génie industriel, nous avons co-rédigé, en 2003, avec le Prf. E. Caillaud (INSA-LGECO, Strasbourg), une demande de labellisation par le GDR MACS, qui a été acceptée en octobre 2003.

Nous avons alors participé à la co-animation de l'un des thèmes de ce GT : intégration des systèmes de connaissances et de compétences industrielles dans les systèmes de pilotage des activités et d'évaluation de la performance.

Les collaborations au sein de ce GT nous ont permis de co-éditer un numéro spécial dans la "Revue Française de Gestion Industrielle" en 2005 suite à un colloque du GT C2EI [DC.1]. Elles ont abouti à la co-rédaction d'un ouvrage AFNOR [DC.4], sur le retour d'expérience, en collaboration avec quatre collègues MdC rattachés à l'Université de Franche-Comté, à l'ENSGSI - Nancy, à l'Université de Technologie de Troyes et à l'INSA de Lyon.

Depuis janvier 2007, nous assurons la responsabilité de l'animation du GT C2EI. Nous avons co-rédigé avec E. Caillaud le bilan scientifique et les perspectives du GT en mai 2007 [Ra.17]. Nous participons à l'animation de l'Axe "conception" du GDR MACS (sous la responsabilité du Prf. M. Aldanondo), en organisant des réunions communes avec le GT IS3C<sup>16</sup> et le GT CSP<sup>17</sup>.

Ces relations au sein de l'Axe Conception se sont révélées aussi être un cadre très propice à une réflexion de fond dans le domaine du pilotage des connaissances et des compétences dans les activités de conception, en mettant en évidence des verrous scientifiques et technologiques. Elles nous ont aussi permis d'engager des collaborations ayant abouti à des co-rédactions ou des co-éditions d'ouvrages et de revues, par exemple co-rédaction d'un article dans "Computers In Industry" [R.5] en 2007 et co-édition, en 2006, d'un ouvrage collectif dressant un état de la recherche nationale sur l'évaluation et l'aide à la décision dans les processus de conception [DC.2].

En novembre 2007, dans le cadre d'un séminaire de l'AFIS à Nancy, nous avons animé un atelier de réflexion sur les modalités d'enseignement de l'Ingénierie Système dans les formations

---

<sup>16</sup> Ingénierie des Systèmes de Conception et Conduite du Cycle de vie

<sup>17</sup> Conception des Systèmes de Production

d'ingénieurs et de masters professionnels. L'objectif était de favoriser le rapprochement entre les chercheurs et les industriels ainsi qu'une large diffusion de l'Ingénierie Système.

En tant qu'animateur du GT C2EI du GDR MACS, nous avons initié, en collaboration avec X. Boucher (EMSE), une démarche de constitution d'un réseau européen sur le thème de l'intégration des connaissances et des compétences dans le pilotage des processus industriels. Ce travail s'est concrétisé par la co-édition d'un numéro spécial dans une revue internationale [DC.3].

Nous avons été chairman lors de notre participation à différents congrès internationaux comme CIGI 2001 à Aix-Marseille, CIGI 2005 à Besançon, INCOM 2006 (session : "Competence modelling for decision support systems") à Saint-Etienne, ICED 2007 (session : "Customer-oriented design") à Paris.

Nous avons assuré la relecture de 34 communications en congrès internationaux (§ 5.3.2).

Nous résumons ci-dessous d'autres responsabilités d'animation scientifique (organisation de sessions spéciales, membre de comité scientifique) :

- Membre du comité scientifique du congrès EXPPAND 2008, "Extended Product and Process Analysis and Design, Bordeaux, 20 & 21 March, Bordeaux.
- Co-organisation de deux sessions spéciales avec I. Deniaud (BETA – Strasbourg), JP. Micaelli (RECITS- UTBM), X.Boucher (EMSE) sur "Knowledge and competence management to support a better product and process life cycle integration", IFAC MCPL, october 2007 The 4th Conference on Management and Control on Production and Logistics.
- Co-organisation de deux sessions spéciales avec X. Boucher (EMSE, Saint-Etienne) "Dynamique des connaissances et des compétences" au 6ème Congrès International de Génie Industriel, juin 2005 à Besançon.
- Co-organisation de 4 sessions spéciales avec B. Yannou sur l'évaluation et la décision dans les processus de conception, 6ème CIGI, 2005, Besançon.
- Membre du comité scientifique du 2ème colloque national du GT C2EI, "Intégration des Connaissances et Compétences en vue de l'amélioration de la performance industrielle", Nancy, 1-2 décembre 2004, organisé par le CRAN et ERPI
- Membre du comité scientifique du 1er colloque national, "Vers l'articulation entre compétences et connaissances", 12-13 décembre 2002, IRIN, Nantes.

### *5.3. Activités de relecture et d'évaluation*

#### **5.3.1. Participation à des jurys de thèse**

Examineur lors des jurys de thèse suivants :

- Blaise Mtopi, [Th.1] (voir p. 26, co-encadrement de thèse).
- Farouk Belkadi, [Th.2] (voir p. 26, co-encadrement de thèse).
- Ghassen Harmel, [Th.3] (voir p. 26, co-encadrement de thèse).
- Imen Ammar Khelil, "Conception collaborative en génie électrique : spécification par l'usage et réalisation d'un environnement d'aide au dimensionnement", 23 janvier 2007, Doctorat de l'Université Joseph Fourier, Spécialité : Génie Electrique, Jury : J-F Boujut (président), C. Espanet (rapporteur), M. Annabi (rapporteur), L. Gerbaud (directeur de thèse), F. Wurtz (encadrant), **E. Bonjour (examineur)**.
- Samuel Rochet, "Formalisation des processus de l'Ingénierie Système : Proposition d'une méthode d'adaptation des processus génériques à différents contextes d'application", 26 novembre 2007, Doctorat de l'INSA de Toulouse, au sein du Laboratoire Toulousain de

Technologie et d'Ingénierie des Systèmes (LATTIS). Jury : C. Percebois (président), C. Rolland (rapporteur), A. Bernard (rapporteur), C. Baron (directrice de thèse), **E. Bonjour (examineur)**, D. Estève (examineur), M. Aldanondo (invité), L. Jaouen (Airbus, invité).

### 5.3.2. Relecture de publications

Le Tableau 2 récapitule les relectures effectuées pour des revues ou congrès.

Revues ou congrès	Nombre de relecture
Journal of Intelligent Manufacturing (2008)	2
Journal of Engineering Design (2007, 2008)	2
Concurrent Engineering: Research and Applications 2006	1
CIGI 2005 (Besançon)	9
INCOM 2006 (Saint-Etienne)	2
CESA IEEE 2006 (Beijing-Chine)	2
Symposium IFAC 2006 (Nancy)	3
IDMME 2006 (Grenoble)	3
"Semaine de la connaissance" 2006 (Nantes)	2
Virtual concept 2006 (Cancun-Mexique)	2
CIGI 2007 (Trois-Rivières – Québec)	1
ICED 2007 (Paris)	15 relectures de résumés étendus et 5 relectures sur papier complet
IEEE IEEM 2007 (Singapour)	2
ICADAM2008 (Haikou – Chine)	2
MOSIM 2008	1
Exppand 2008 (Bordeaux)	1

Tableau 2 : Synthèse des relectures de communications

### 5.3.3. Commissions de Spécialistes

Membre de la CSE 61ème section, ENSMM / Université de Franche-Comté :

- De 2001 jusqu'en août 2007, en tant que suppléant,
- Depuis septembre 2007, en tant que titulaire.
- Depuis février 2008 : vice-président

Membre de la CSE multi-sections de l'ENSAIS – Strasbourg de 2000 à 2002 en tant que suppléant

## 5.4. Co-encadrement de thèse

### 5.4.1. Thèses soutenues

- [Th1] Mtopi Fotso Blaise Eugène, "Contribution à une méthodologie de conception modulaire : Modélisation de la diversité dans les familles de produits". Université de Franche-Comté, soutenue le 12 juillet 2006. Jury : Maryvonne Dulmet et Eric Bonjour (directeurs de thèse), Michel Aldanondo et Emmanuel Caillaud (rapporteurs), Jean-Michel Henrioud (président), Olivier Garro. Taux d'encadrement : 30%
- [Th2] Belkadi Farouk, "Contribution au pilotage des compétences dans les activités de conception : De la modélisation des situations à la caractérisation des compétences", Université de Franche-Comté, soutenue le 21 novembre 2006. Jury : Maryvonne Dulmet et Eric Bonjour (directeurs de thèse), Bernard Grabot et Jean Pierre Bourey (rapporteurs),

Bernard Descote-Genon (Président), Jean Renaud, Jean-Michel Henrioud, Xavier Boucher.  
Taux d'encadrement : 60%

- [Th3] Harmel Ghassen, "Conception conjointe des architectures du produit et de l'organisation du projet dans le cadre de l'ingénierie système", Université de Franche-Comté, soutenue le 05 juillet 2007. Jury : Maryvonne Dulmet et Eric Bonjour (directeurs de thèse), Alain Bernard et Gérard Morel (rapporteurs), Michel Aldanondo (Président), Jean-François Boujut, Dominique Loise (PSA), Jean-Pierre Micaëlli. Taux d'encadrement : 70%

#### 5.4.2. Thèse en cours

- [Th4] Hlaoittinun Onanong, "Structuration des projets de conception de systèmes mécatroniques", Université de Franche-Comté, soutenance prévue en mai 2009. Maryvonne Dulmet et Eric Bonjour (directeurs de thèse). Taux d'encadrement : 70%

#### 5.4.3. Devenir des doctorants

Le Tableau 3 présente le mode de financement des thèses et le devenir des doctorants que j'ai co-encadrés.

Nom du doctorant	Mode de financement et durée	Situation actuelle
Blaise Mtopi	Financement sur contrat, bourse EGIDE – durée de la thèse : 4 ans dont 24 mois financés et passés au LAB	Maître assistant rattaché à l'IUT Victor de Bandjoun, Dépt GMP – Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes et de l'Environnement – Cameroun
Farouk Belkadi	Financement sur contrat, bourse EGIDE – 36 mois	ATER à l'IFMA de Clermont-Ferrand en 2006-2007 - Post-doc à l'UTC à partir de 10.2007
Ghassen Harmel	Financement sur contrat, bourse EGIDE – 40 mois	Chef de projet au sein de l'entreprise "One Tech", sous-traitant automobile, en Tunisie depuis 10.2007.
Onanong Hlaoittinun	Financement sur contrat, bourse EGIDE – 36 mois	Thèse actuellement en cours de 3 <sup>ème</sup> année – 1/2 poste ATER à l'UFC à compter du 01/09/2008

Tableau 3 : Mode de financement des thèses et situation des docteurs

### 5.5. Autres activités d'encadrement

#### DEA et Master Recherche, au sein du LAB

- [D1] Tan WEI, 2005, Contribution à la spécification et à la réalisation d'un support de conception collaborative, Master Recherche Spécialité Mécatronique.
- [D2] Imen Ammar, 2003, Identification des sources d'incertitudes dans les activités de conception, DEA Informatique, Automatique et Productique.
- [D3] Aberhamman Lashab, 2003, Modélisation de la coopération entre plusieurs experts : Application à la télé-expertise coopérative, DEA Informatique, Automatique et Productique.
- [D4] Farouk Belkadi, 2002, Analyse des processus de conception en vue de leur modélisation, DEA Informatique, Automatique et Productique.

[D5] Rabah Djaoud, 2002, Capitalisation des connaissances dans les activités de conception, DEA Informatique, Automatique et Productique.

### **Stages et projets industriels d'étudiants en maîtrise ou en master professionnel**

Encadrement de plus de 20 apprentis, 30 stagiaires et 25 projets industriels dans les formations MST ATIBA, DESS Productique Appliquée puis après le LMD, dans le master Ingénierie Système, le master mécanique et la licence professionnelle Bois et Ameublement.

## **6. RESPONSABILITES PEDAGOGIQUES**

De 1998 à 2004, nous avons assumé la responsabilité de la Maîtrise de Sciences et Techniques "Arts et Techniques Industrielles du Bois et de l'Ameublement" au sein de l'Université de Franche-Comté. Lors du passage au LMD, nous avons transformé cette formation en Master Ingénierie Système avec des applications dans les industries du bois.

### **6.1. Rédaction de programmes pédagogiques**

Nous avons rédigé les programmes d'habilitation suivants :

- En 1998-1999, demande de l'ouverture de la formation MST ATIBA par la voie de l'apprentissage, auprès du Conseil Régional de Franche-Comté ; formation ouverte en septembre 1999.
- En 1999-2000, rédaction du programme pédagogique de la MST ATIBA pour renouvellement, avec ouverture de deux options - option 1 : Ameublement, option 2 : construction bois. Participation à la rédaction d'une option conception au sein du DESS PA pour permettre aux étudiants ATIBA un accès local à Bac+5. Formations renouvelées et options ouvertes en septembre 2000.
- En 2001, rédaction d'une lettre d'intention pour la demande d'ouverture d'une formation Licence Professionnelle Bois et Ameublement, présentation du dossier au ministère. Formation ouverte en 2002 sous la responsabilité de notre collègue, M. Dulmet.
- En 2004, rédaction du programme pédagogique pour la création du master Ingénierie Système, avec deux options - option 1 : Ameublement et agencement, option 2 : construction bois. Mutualisation et co-rédaction de trois modules ("Sciences de la conception I et II" et "Innovation") avec le master Mécatronique, option Innovation et Conception.

L'ensemble de la réflexion sur la rédaction d'un programme pédagogique, en collaboration avec des industriels, a duré à chaque renouvellement entre six mois et un an.

Lors de la création du master Ingénierie Système, nous avons rédigé un questionnaire à l'attention de directeurs de services de Recherche & Développement, création, conception ou industrialisation. Nous avons ensuite confronté leur avis par rendez-vous, entretiens téléphoniques et réunions de travail.

Nous avons ainsi identifié les compétences visées à l'issue du master Ingénierie Système qui peuvent se résumer ainsi :

- 1) Concevoir et industrialiser des produits industriels nouveaux : formuler les besoins des clients, réaliser des esquisses, trouver des solutions techniques, réaliser des calculs et des essais, définir les procédés...
- 2) Mettre en œuvre et transformer des produits bois, des dérivés et des matériaux connexes, comme le verre, le cuir, l'acier, ...

- 3) Organiser et conduire des projets : gérer un projet du point de vue technique et économique, gérer les connaissances et les compétences, gérer les risques, structurer des processus, gérer la documentation...
- 4) Innover : gérer des projets innovants, accomplir des travaux exploratoires, participer à la recherche de nouveaux concepts, animer des réunions de créativité...

Les deux premières compétences étaient principalement maîtrisées au niveau Bac+4 et les deux dernières, surtout acquises au niveau Bac+5. Nous nous sommes attachés à définir la progression des apprentissages et à multiplier les collaborations industrielles, dans ou en dehors de la formation, pour permettre aux étudiants de développer de réelles compétences.

Concernant le master Mécatronique au sein de l'Université de Franche-Comté, pour l'habilitation de 2004 et pour celle de 2008, nous assurons la responsabilité de l'Unité d'Enseignement (UE) "Sciences de la conception II" et la demi-UE "Management de projet" répondant à la compétence de type 3 ci-dessus. Nous avons co-rédigé avec le Professeur P. Lutz l'UE "Sciences de la conception I", orientée vers l'apprentissage des principales méthodes de conception (AF, AV, QFD, conception axiomatique, introduction à l'Ingénierie Système).

## *6.2. Recrutement et devenir des étudiants*

Nous avons intentionnellement maintenu chaque année un équilibre entre les étudiants provenant de filière technique (BTS filière bois, DUT Génie Mécanique) et les autres provenant des DEUG Sciences, afin d'entretenir une harmonie entre des étudiants de connaissances hétérogènes. Le but de la formation n'était pas de fournir un parcours type standard mais de permettre à chaque étudiant de développer des compétences spécifiques en fonction de ses aspirations et de ses potentialités. Le suivi individualisé des apprentissages, les deux options ouvertes en 2000 ainsi que les expériences professionnelles ont contribué à l'épanouissement de nos étudiants.

Même si nous ne disposons pas d'enquête complète sur le devenir de nos étudiants, les rencontres lors des soirées des Anciens nous permettent d'affirmer que leur insertion professionnelle était bonne avec des postes en adéquation avec leurs attentes, en termes de fonction et salaire.

## *6.3. Gestion du personnel*

Comme tout responsable de formation, nous avons assumé des responsabilités de gestion du personnel :

- Rédaction du dossier et proposition de recrutement d'un PAST, architecte en construction bois - deux renouvellements de contrat ;
- Gestion du travail d'un technicien BAP 4, chargé de la maintenance de l'atelier de prototypage et de la gestion des matériels et logiciels informatiques;
- Choix des intervenants extérieurs et définition de leurs objectifs pédagogiques et modes d'intervention ; coordination et suivi des heures travaillées pour leur paiement (en collaboration avec Rémy Leloup, PRCE Génie Industriel Bois). Nous recrutons, chaque année, de 5 à 10 vacataires enseignants dans les lycées techniques comtois et de 10 à 20 vacataires industriels (matières concernées : design industriel, marketing, dimensionnement de structures lamellés-collés, BE bois-béton, conduite de chantier, ...).

## 6.4. Communications extérieures et valorisation

Cette fonction nous a amené à améliorer nos outils de communication et de valorisation de notre formation, afin d'attirer un grand nombre d'étudiants et de sélectionner les meilleurs candidats. La formation par la voie de l'apprentissage a été un atout important en termes d'attractivité, même si une formation universitaire n'a pas le même potentiel d'attractivité qu'une Ecole d'ingénieurs (en particulier, l'ENSTIB à Epinal, l'ESB à Nantes).

Cette fonction nous a amené à réfléchir sur les moyens à mettre en œuvre pour d'une part, augmenter le nombre de candidatures et améliorer le niveau du recrutement et d'autre part, promouvoir notre formation auprès des industriels. Nous avons coordonné ou réalisé différents axes de travail :

- Elaboration de supports de présentation de notre formation, présentant deux volets complémentaires : l'un destiné aux responsables d'entreprises et l'autre aux étudiants de niveau bac+ 2 (affiches, plaquettes et site internet) ;
- Promotion de notre formation dans les établissements de niveau bac+2 (interventions d'étudiants dans leurs établissements d'origine, présence dans les forums ...) et dans les salons professionnels ;
- Réalisation d' "événements" permettant de solliciter la presse : un entretien à RadioFranceBesançon (en 1999, pour l'ouverture de la formation par apprentissage), un article dans un journal spécialisé du bois ("Le bois national" en 2000 puis en 2003), des articles dans la presse comtoise (Est Républicain, presse du pays de Montbéliard, presse du Jura).
- Participation à l'organisation de journées portes ouvertes annuelles de l'UFR Sciences et Techniques, avec conférence de présentation de la formation destinée aux élèves et enseignants du secondaire, pour améliorer l'image des filières technologiques universitaires et développer le recrutement local.
- Obtention du soutien de syndicats ou d'associations de professionnels : dès 1999, soutien de AFCOBOIS, de l'ADIB, de l'association des constructeurs de maisons bois de Franche-Comté, et en 2005, soutien de l'UNIFA.
- Représentation de l'Université dans des conseils d'administration : au Conseil d'Administration de l'ADIB de 1998 à 2005 et au comité de pilotage de la plateforme technologique bois située à Mouchard (39) de 2003 à 2005.



## 7. ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT

Dans cette partie, nous présentons une synthèse des activités réalisées, d'abord en tant que moniteur et ATER de 1993 à 1998, puis en tant que maître de conférences à l'Université de Franche-Comté depuis 1998.

### 7.1. Synthèse des enseignements réalisés en tant que moniteur et ATER de 1993 à 1998

Nous résumons ci-dessous les activités d'enseignement réalisées entre 1993 et 1996, en tant que moniteur puis entre 1996 et 1998 en tant que ATER à l'IUT de Belfort-Montbéliard.

1993 - 1994 : Moniteur à la Faculté des Sciences et Techniques (Besançon)

- Automatique et logique (TD, 30 H et TP, 52H), niveau DEUG

1994 - 1995 : Moniteur à l'ENSM

- Automatique (TP, 96 H), 2ème année ENSM

1995 - 1996 : Moniteur à la Faculté des Sciences et Techniques (Besançon)

- Automatique et logique (TD, 18 H et TP, 69H), DEUG TI et DEUST PAI
- Proposition et co-encadrement d'un sujet de DEA en ordonnancement

1996 - 1997 : ATER à l'IUT Belfort-Montbéliard,

Département Génie des Télécommunications et Réseaux (GTR)

- Traitement du signal (TP, 102H), 2ème année
- Electronique numérique et électronique des composants (TP, 174H) 1ère année

1997 - 1998 : ATER à l'IUT Belfort,

Département Organisation et Génie de la Production

- Logiciel d'ordonnancement Préactor (TP, 28H), 2ème année OGP
- Jeux pédagogiques : Kanban et Réactik (identification des anti-flux)
- Cours/TD d'OGP (TD, 60H), 2ème année GMP
- Réseaux Locaux Industriels et Graft (TP, 32H), 1ère année GTR

### 7.2. Synthèse des enseignements en tant que Maître de Conférences

Depuis notre arrivée à l'UFR des Sciences et Techniques de Besançon en septembre 1998, nous effectuons notre enseignement au sein du Groupe Automatique et Productique (GAP) de l'UFR Sciences et Techniques de Besançon. Les enseignants-chercheurs du GAP réalisent des enseignements dans les domaines de l'automatique, la productique, la robotique, la vision et l'informatique industrielle.

Notre service d'enseignement se répartit sur le deuxième et troisième cycle universitaire, en formation initiale. Il a évolué suite au passage au LMD (Licence, Master, Doctorat) en septembre 2004.

La majorité de nos enseignements est en lien direct avec nos travaux de recherche. Cela concerne l'approche système, les méthodes de conception (avec la nécessité pour les étudiants de comprendre les caractéristiques de l'activité de conception), l'introduction à l'ingénierie système

(principes de l'IS, architecture modulaire, famille de produits), le management de projet et le management des compétences.

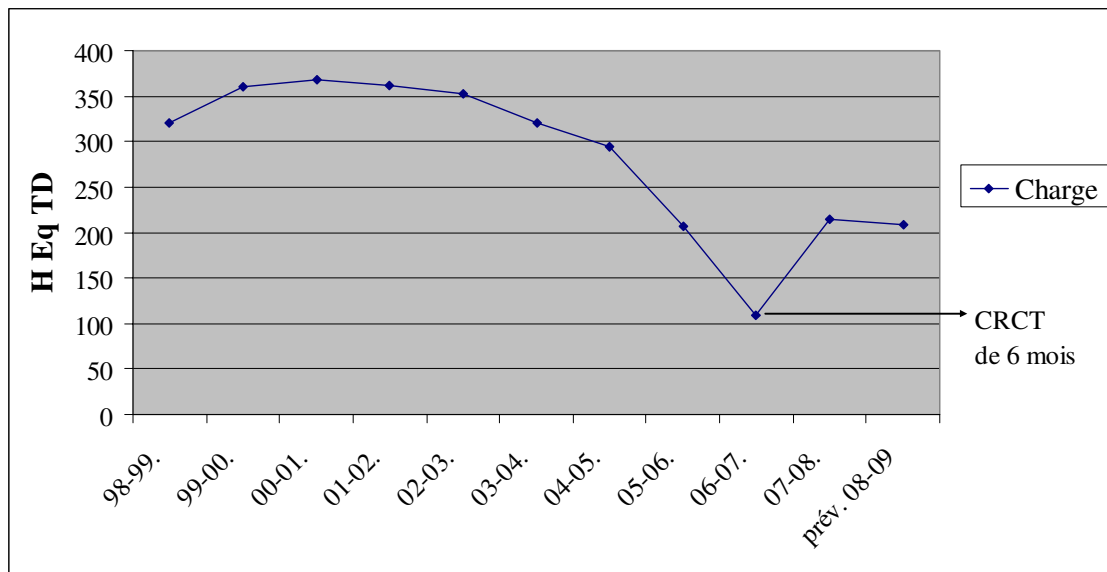


Figure 5: Charges d'enseignement entre 1998 et 2007, et prévision pour 2007-2008

Nous avons ainsi maintenu une **imbrication forte entre nos activités de recherche et celles d'enseignement**. En effet, nos travaux de recherche sont valorisés par une diffusion au sein de nos enseignements. Inversement, nos collaborations industrielles dans le cadre de ces enseignements nous ont permis de trouver des terrains d'analyse d'activités et d'expérimentation pour notre recherche (plus grande facilité d'accès à l'information dans une PME par rapport à un grand Groupe).

La Figure 5 représente l'évolution de notre charge annuelle d'enseignement depuis 1998. Trois remarques peuvent être faites :

- une charge élevée, supérieure à 300 Heures Equivalent TD (H Eq TD), entre 1998 et 2005,
- une charge proche du niveau statutaire en 2005-2006, ainsi que pour l'année 2007-2008.
- une demi-charge en 2006-2007.

De 1998 à 2005, nous avons assumé la responsabilité d'une formation professionnelle<sup>18</sup> à l'UFR Sciences et Techniques et nous sommes intervenus principalement dans cette formation. Un gros travail d'encadrement de projets, de stages et de contrats d'apprentissage était nécessaire pour suivre la progression pédagogique des étudiants, les conseiller ou les orienter dans leurs apprentissages professionnels et répondre aux sollicitations des industriels. En 2005, un collègue a accepté de reprendre cette responsabilité. Ce qui explique la forte baisse de charge sur 2005-2006. Nous avons ainsi pu nous consacrer plus fortement à nos activités de recherche. En 2006-2007, nous avons obtenu un CRCT de six mois, accordé par notre établissement de rattachement, l'Université de Franche-Comté.

Le Tableau 4 indique les volumes horaires effectués par niveau de formation. Nous assurons l'intégralité de nos enseignements sur les niveaux Licence, ex-maîtrise et Master.

<sup>18</sup> D'abord de la MST ATIBA de 1998 à 2004 puis du Master Ingénierie Système avec une année de transition, difficile à gérer, 2004-2005 qui marque la fin de la première année de la MST et le début par la deuxième année du Master.

	Niveau des formations						
	avant LMD		transition LMD			après LMD	
	Licence, MST, IUP	DESS	Licence	MST2, IUP, Master1	Master 2	Licence	Master
98-99.	240	80					
99-00.	256	87					
00-01.	267	101					
01-02.	257	105					
02-03.	274	78					
03-04.	246	53					
04-05.			49	176	69		
05-06.						47	159
06-07.(CRCT)						21	89
07-08.						39	175
Moyenne	260	85	49	176	69	43	171
08-09.prév						73	135

**Tableau 4 : Volumes horaires effectués par niveau de formation**

La répartition de nos enseignements selon le type de matières enseignées est présentée dans le Tableau 5.

	Gestion de production	Qualité et approche système	Gestion de projet et des compétences	Méthodes de conception, Ingénierie Système	Divers	stages, projets, apprentis	Total Année en H Eq TD
98-99.	20	40	0	46	24	190	320
99-00.	20	40	0	46	31	223	361
00-01.	20	51	43	55	7	193	368
01-02.	0	51	45	55	7	205	362
02-03.	0	51	45	55	19	183	353
03-04.	0	51	27	56	7	179	320
04-05.	21	38	37	50	4	144	294
05-06.	30	30	52	20	0	74	206
06-07.(CRCT)	26	23	45	16	0	0	110
07-08.	43	23	51	44	0	53	214
Moyenne	18	40	34	44	10	145	291
08-09.prév	12	20	79	56	0	41	208

**Tableau 5 : Volumes horaires effectués par type de matières enseignées**

La répartition réelle en Cours / TD / TP est d'environ ½ / ¼ / ¼ dans chaque UE.



## Partie II. Production scientifique

### 1. PUBLICATIONS EN REVUES AVEC COMITE DE LECTURE

- [R.1] **E. Bonjour**, P. Baptiste, "A trade-off between data quality and updating costs in scheduling databases", APII-JESA, Vol. 32, N°4, juin 1998, pp. 467-486.
- [R.2] **E. Bonjour**, P. Baptiste, "Improving the quality of manufacturing databases used in CAPM", Journal of Decision Systems, Vol. 9, N°1, 2000, pp. 55-76.
- [R.3] F. Belkadi, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "Démarche de modélisation d'une situation de conception collaborative", Revue Document numérique. Vol. 8, n°1/2004, pp.93-106.
- [R.4] F. Belkadi, **E. Bonjour**, M. Dulmet, Modelling Framework of a Traceability System to Improve Knowledge Sharing and Collaborative Design, Lecture Notes in Computer Science, Springer Verlag Berlin, Vol. 3865, 2006, pp. 355-364.
- [R.5] X. Boucher, **E. Bonjour**, B. Grabot, "Formalisation and use of competencies for industrial performance optimisation: a survey", Computers in industry, Vol. 58, N°2, 2007, pp. 98-117.
- [R.6] F. Belkadi, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "Competency characterisation by means of work situation modelling", Computers in industry, Vol. 58, N°2, 2007, pp. 164-178.
- [R.7] **E. Bonjour**, G. Harmel, J-P. Micaëlli, M. Dulmet, "Simulating change propagation between product architecture and development organization", International Journal of Product Development, accepté pour publication en 2008, 20p.
- [R.8] O. Hlaouittinun, **E. Bonjour** and M. Dulmet, "A Multidisciplinary team building method based on competency modelling in design project management", International Journal of Management Science and Engineering Management, Vol. 3, N° 3, 2008, pp.163-175.
- [R.9] **E. Bonjour**, M. Dulmet, G. Harmel, "Mapping Functional Architecture Decisions onto Physical Product Architectures", INSIGHT, Publication of INCOSE, Short paper, accepté pour publication en 2008.
- [R.10] F. Belkadi, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "De la modélisation des situations de travail à la caractérisation des compétences : une approche par la logique floue", JESA, Journal Européen des Systèmes Automatisés, A paraître n°1-2, 2009, 37p.
- [R.11] B. Mtopi, M. Dulmet, **E. Bonjour**, "Modélisation par les grammaires de graphes de la génération de la diversité dans les familles de produits", JESA, Journal Européen des Systèmes Automatisés, Hermès Science, A paraître n°1-2, 2009, 30p.

### 2. CONTRIBUTIONS A OUVRAGE

- [Ch1] **E. Bonjour**, M. Dulmet, "Piloteage des activités de conception par l'Ingénierie Système", in Ingénierie de la conception et cycle de vie du produit, (sous la direction de Roucoules L., éd.), Hermès, janvier 2006, pp. 85-105.
- [Ch2] F. Belkadi, N. Troussier, F. Huet, T. Gidel, **E. Bonjour** and B. Eynard, "Innovative PLM-Based approach for collaborative design between OEM and suppliers: case study of aeronautic industry", In Cascini G. (Ed.), "Computer-Aided Innovation", Springer, Vol. 277, pp. 157-168, 2008.
- [Ch3] **E. Bonjour**, "Du retour d'expérience au développement des compétences", in "Retour et capitalisation d'expériences", (Editeurs : J. Renaud, **E. Bonjour**, B. Chebel-Morello, B. Fuchs, N. Matta), chapitre 5, pp 155-198, AFNOR, 2008.

### 3. CO-EDITION DE NUMERO SPECIAL OU OUVRAGE

- [DC.1] **E. Bonjour**, X. Boucher, E. Caillaud, J. Le Cardinal, M. Lombard, N. Matta, J. Renaud (Equipe organisation du congrès C2EI), *Revue Française de Gestion Industrielle*, Numéro Spécial, "Knowledge management - Intégration des connaissances et compétences en vue de l'amélioration de la performance industrielle", Vol. 24, N°1 (Editorial, pp 3-5), 2005.
- [DC.2] B. Yannou, **E. Bonjour** (sous la Dir. De), "Evaluation et décision dans les processus de conception", Ed. Hermès Sciences, Série Productique, collection Traité IC2, 2006, 251p.
- [DC.3] X. Boucher, **E. Bonjour**, N. Matta (co-editors) Special issue: "Competence management in industrial process", *Computers in industry*, February 2007.
- [DC.4] J. Renaud, **E. Bonjour**, B. Chebel-Morello, B. Fuchs, N. Matta (Editeurs), "Retour et capitalisation d'expériences", AFNOR, Paris, 2008, 184p.

### 4. LISTE DES COMMUNICATIONS

#### 4.1. *Communication à des colloques internationaux, avec comité de lecture et actes*

- [CI.1] M. Dulmet, **E. Bonjour**, P. Chazelet, G. Mercier, "From the human factor to the skills of actors in the industrial world", Proc. of the 2<sup>nd</sup> Conference on Management and Control of Production and Logistics, IFAC/IEEE/SMC/IFIP/MCPL'2000, sur CD ROM, pp. 359-363, 5-8 juillet 2000, Grenoble, France.
- [CI.2] M. Dulmet, **E. Bonjour**, F. Lhote, G. Mercier, "Modèle de caractérisation interne des compétences mises en oeuvre dans les entreprises", Actes du 4<sup>ème</sup> Congrès International de Génie Industriel, Vol. 2, pp. 911-920, 12-15 juin 2001, Aix-en-Provence-Marseille.
- [CI.3] M. Dulmet, **E. Bonjour**, F. Lhote, "Modélisation sociotechnique d'une unité de production automatisée", Actes de la Conférence Internationale sur la Productique, CIP'2001, sur CD ROM, 7 pages, 9-10-11 juin 2001, Hôtel Sheraton, Club des Pins, Alger, Algérie.
- [CI.4] M. Dulmet, **E. Bonjour**, F. Lhote, "Towards the integration Design-Manufacturing in Production Systems : a case study about the role of start-up Team", Proc. of the 10<sup>th</sup> Conf. on Information Control in Manufacturing, IFAC, INCOM'01, 6p., Vienne, Autriche, September 2001.
- [CI.5] **E. Bonjour**, M. Dulmet, F. Lhote, "Interests and limits of an external approach for the management of competencies in the enterprises", Proc. Int. Conf. on Industrial Engineering and Production Management, IEPM, 10 pages, Quebec City, Canada, August 2001.
- [CI.6] M. Dulmet, F. Lhote, **E. Bonjour**, "Resources characterisation in manufacturing systems", Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, SMC'2002, sur CD ROM, 6 pages, Hammamet, Tunisie, 6-9 octobre 2002.
- [CI.7] **E. Bonjour**, M. Dulmet, F. Lhote, "An internal modelling of competency, based on a systemic approach, with socio-technical systems management in view", Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, SMC'2002, sur CD ROM, 6 pages, Hammamet, Tunisie, 6-9 octobre 2002.
- [CI.8] M. Dulmet, **E. Bonjour**, "Vers un méta-modèle de pilotage du système de compétences de l'entreprise", Actes du 5<sup>ème</sup> Congrès International de Génie Industriel, sur CD ROM, 10 pages, Université de Laval, Québec, Canada, 26-29 octobre 2003.
- [CI.9] M. Dulmet, **E. Bonjour**, "A systemic model of competency based on the design activity analysis", 7<sup>th</sup> World Multiconference on Systemics and Cybernetics and Informatics (SCI 2003), IEEE, Orlando, USA, 27-30 July 2003.

- [CI.10] **E. Bonjour**, M. Dulmet, "Making explicit the connections between knowledge management and competencies management", Proc. of the Int. Conf. on Industrial Engineering and Production Management, IEPM, 10p., Porto, Portugal, May, 26-28, 2003.
- [CI.11] **E. Bonjour**, M. Dulmet, "Modèle cognitif d'une compétence : Application à l'activité de conception", Actes de la Conférence Internationale Francophone d'Automatique, CIFA'2004, CD ROM, 6 pages, Douz, Tunisie, 22-24 novembre 2004.
- [CI.12] B. Mtopi Fotso, M. Dulmet, **E. Bonjour**, "Different Models to Support Concurrent Design of Product family", Proc. of 5<sup>th</sup> International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, IDMME, Bath, UK, 11 p., April, 5-7, 2004
- [CI.13] B. Mtopi Fotso, M. Dulmet, **E. Bonjour**, "Product family in concurrent design", 10<sup>th</sup> IFAC/IFORS/IMACS/IFIP Symposium on LSS 2004 (Large Scale Systems: Theory and Applications), Vol. 1, Osaka, Japan, pp 118-123, July 26 – 28, 2004.
- [CI.14] B. Mtopi Fotso, M. Dulmet, **E. Bonjour**, "Concurrent Design of Product Family: From the Functional Model to the Material Model", Proc. of Third Conf. on Management and Control of Production and Logistics, IFAC/IEEE/IFIP, Brazil, pp. 151-156, Nov. 2004.
- [CI.15] F. Belkadi, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "Proposition of a situation model in view to improve collaborative design", Proc. of the 11<sup>th</sup> IFAC Symposium on Information Control in Manufacturing, INCOM'2004, CD ROM, Salvador da Bahia, Brazil, 6 p., April 5-7, 2004.
- [CI.16] **E. Bonjour**, M. Dulmet, F. Lhote, "Models to split and to integrate competencies systems in design activities management", Proc. of the 11<sup>th</sup> IFAC Symposium on Information Control in Manufacturing, INCOM'2004, Salvador da Bahia, Brazil, 6 p., April 5-7, 2004.
- [CI.17] **E. Bonjour**, J. Renaud (ENSGSI – Nancy), "Pilotage des systèmes de connaissances et de compétences : Comment définir les concepts principaux ?", Actes du 6<sup>ème</sup> Congrès International de Génie Industriel, CD ROM, 10 pages, Besançon, France, 7-10 juin 2005.
- [CI.18] **E. Bonjour**, J.P. Micaëlli, M. Dulmet, "Modélisation récursive des compétences d'acteurs collectifs en conception intégrée", Actes du 6<sup>ème</sup> Congrès International de Génie Industriel, GI'2005, CD ROM, 12 pages, Besançon, France, 7-10 juin 2005.
- [CI.19] F. Belkadi, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "Traçabilité des activités de conception et constitution d'une mémoire de projet : une démarche conceptuelle", Actes du 6<sup>ème</sup> Congrès International de Génie Industriel, CD ROM, 10 pages, Besançon, France, 7-10 juin 2005.
- [CI.20] F. Belkadi, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "Capitalization approach of the design situation based on the interaction concept and the cognitive organisation view", Proc. of the 12<sup>th</sup> European Concurrent Engineering Conference, pp. 93-97, Toulouse, France, April 11-13, 2005.
- [CI.21] F. Belkadi, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "A model of the work – Situation in order to improve traceability process in collaborative design", Proc. of the 9<sup>th</sup> International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, Vol. 1, pp. 89-94, Coventy, United Kingdom, May 24-26, 2005.
- [CI.22] F. Belkadi, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "Contribution to the development of a project memory: A new approach of traceability including the organization activity view", Proc. of the 9<sup>th</sup> World Multi-Conference on Systemic, Cybernetics and Informatics, MWCSCI'2005, sur CD ROM, 6 pages, Orlando, Floride, USA, July 10-13, 2005.
- [CI.23] F. Belkadi, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "A fuzzy approach for competency characterisation based on a work situation analysis", Proc. of the 9<sup>th</sup> IFAC Symposium on Automated Systems Based on Human Skill and Knowledge, ASBHS'2006, CD ROM, 6 pages, May 22-24, Nancy, France, 2006.
- [CI.24] G. Harmel, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "Products, processes and organisation architecture modelling: from strategic expectations to strategic competencies", 12<sup>th</sup> IFAC Symposium on Information Control problems in Manufacturing, INCOM, IFAC/IEEE/IFIP, CD ROM, 6 pages, Saint-Etienne, May 2006.

- [CI.25] G. Harmel, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "A method to manage the co-evolution of product and organization architectures", IMACS-IEEE Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications, CESA 2006, Beijing, China, October 4-6, 2006.
- [CI.26] B. Mtopi Fotso, M. Dulmet, **E. Bonjour**, "Design of product families based on a modular architecture", Proc. of the First Int. Conf. on Multidisciplinary Design Optimization and Applications, D.H. Bassir *et al.* (eds.), 6p., Besançon, France, April 17-20, 2007.
- [CI.27] **E. Bonjour**, JP Micaelli, O. Hlaioittinun, I. Deniaud, "Design and Core Competency, the Missing Links", Elsevier-IFAC MCPL 2007, Sibiu, Roumanie, September 27-30<sup>th</sup>, 2007.
- [CI.28] O. Hlaioittinun, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "Méthodologie pour la constitution d'équipes de projet de conception", 7<sup>e</sup> Congrès International de Génie Industriel, Trois-Rivières, Québec, 5-8 juin 2007.
- [CI.29] O. Hlaioittinun, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "A fuzzy array-based clustering method in team building", Elsevier-IFAC MCPL 2007, Sibiu, Roumanie, September 27-30<sup>th</sup>, 2007.
- [CI.30] O. Hlaioittinun, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "A team building approach for competency development", Proc. IEEE 2007, International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, December 2-5, pp. 1004 – 1008, 2007.
- [CI.31] G. Harmel, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "A fuzzy method to design both functional and physical product architectures", International Conference on Engineering Design, ICED'07, Paris, 10p., 28-31 August 2007.
- [CI.32] **E. Bonjour**, G. Harmel and M. Dulmet, "Defining product architectures", Exppand 2008, Extended Product and Process Analysis aNd Design, Bordeaux, 8p., 20 & 21 March 2008.
- [CI.33] F. Belkadi, N. Troussier, B. Eynard, **E. Bonjour**, "PLM based approach for suppliers integration in the design process of assembly tools", Proceedings of IDMME - Virtual Concept 2008, Beijing, China, October 8 – 10, 2008

#### 4.2. *Communication à des colloques nationaux, avec comité de lecture et actes*

- [CN.1] A. Beretti (PSA), **E. Bonjour**, M. Dulmet, F. Lhote, G. Mercier, "Modèle d'analyse des compétences à partir d'une caractérisation de l'activité", Actes du colloque "Gestion des compétences et des connaissances en Génie Industriel", Session "Modéliser l'entreprise pour gérer les compétences", EMSE, 9 pages, novembre 2000, Saint-Etienne.
- [CN.2] **E. Bonjour**, M. Dulmet, "Articulation entre pilotage des systèmes de compétences et gestion des connaissances", Actes du 1<sup>er</sup> Colloque du groupe de travail : Gestion des Compétences et des Connaissances en Génie Industriel, GCC GI'2002, pp. 43-50, 12-13 décembre 2002, Nantes.
- [CN.3] F. Belkadi, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "Vers un modèle de situation support à la conception collaborative", Actes du Colloque Coopération Innovation et Technologies, CITE'2003, pp. 247-264, 3-4 décembre 2003, Troyes.
- [CN.4] **E. Bonjour**, JP Micaelli, M. Dulmet, "Modélisation de la structure et de la dynamique des systèmes de compétences collectives : apports de la systémique et la théorie de la cognition pour l'action", Actes du 2<sup>ème</sup> colloque du groupe de travail C2EI "intégration des connaissances et des compétences en vue de la performance industrielle, 6 pages, 1-2 Décembre 2004, Nancy
- [CN.5] G Harmel, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "Pilotage par l'incertitude des compétences et des processus d'entreprise", Actes du 2<sup>ème</sup> colloque du groupe de travail C2EI "intégration des connaissances et des compétences en vue de la performance industrielle, CD ROM, 6 pages, 1-2 Décembre 2004, Nancy



- [CN.6] F. Belkadi, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "Intérêt d'un modèle de la situation de travail pour le pilotage des systèmes de compétences", Actes du 2<sup>ème</sup> colloque du groupe de travail C2EI "intégration des connaissances et des compétences en vue de la performance industrielle, CD ROM, 7 pages, 1-2 Décembre 2004, Nancy
- [CN.7] G.Harmel, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "Architecture des systèmes complexes: modélisation et pilotage par l'incertitude", 4<sup>e</sup> congrès annuel de l'AFIS, actes CD, Toulouse, mai 2006
- [CN.8] G. Harmel, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "Architecture des produits et des organisations : modélisation et pilotage par l'incertitude", Actes de la 6<sup>ème</sup> Conférence Francophone de Modélisation et Calcul, MOSIM'06, CD ROM, 9 pages, 3-5 avril 2006, Rabat, Maroc.
- [CN.9] F. Belkadi, M. Dulmet, **E. Bonjour**, " Cadre conceptuel pour un système de traçabilité en conception collaborative", 10<sup>ème</sup> Colloque AIP PRIMECA, La Plagne, avril 2007

### 4.3. Communications diverses

- [Cd.1] **E. Bonjour**, M. Dulmet, F. Lhote, G. Mercier, B. Bonnamour, "Modélisation des compétences basée sur une approche systémique et sur une caractérisation de l'activité.", Cinquième Journée d'Etude. Groupe de gestion des Compétences et des Connaissances en Génie Industriel, "De la modélisation des compétences à la gestion des compétences organisationnelles", pp 1-17, 17 mai 2001, Bonneville.
- [Cd.2] M. Dulmet, **E. Bonjour**, F. Lhote, G. Mercier, "Modélisation systémique de la compétence", Conférence invitée. Colloque organisé conjointement par le CEREQ et les Clubs ECRIN, 22-23 novembre 2001, Marseille.
- [Cd.3] M. Dulmet, **E. Bonjour**, G. Mercier, Ph. Chazelet, "Modélisation conjointe de l'activité et des compétences à partir d'une approche systémique", Journées Bilan du GRP, Groupe Modélisation d'Entreprise, 8-9 novembre 2001, Toulouse.
- [Cd.4] **E. Bonjour**, M. Dulmet, A. Beretti (PSA), "Sur le pilotage des processus de compétenciation en entreprise", 6<sup>ème</sup> séminaire du Groupe Gestion des Connaissances et des Compétences, Besançon en 28 juin 2002, acte CD avec transparents et résumés étendus.
- [Cd.5] **E. Bonjour**, "Amélioration des activités de conception par le pilotage des systèmes de compétences", conférence invitée au sein de l' Equipe de Recherche sur les Processus Innovants, ENSGSI/ERPI, Nancy, 17 décembre 2003
- [Cd.6] F. Belkadi, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "Proposition d'un modèle de situation pour le pilotage des activités de conception", journées GDR MACS, Ecole Centrale de Nantes, Mars 2004
- [Cd.7] O. Hlaoittinun, **E. Bonjour**, M. Dulmet, "Structuration des équipes de conception en fonction des compétences", journées GDR MACS, La Rochelle, mars 2007.
- [Cd.8] J-P. Micaëlli, **E. Bonjour**, "Gérer le développement de produits complexes : enjeux de la conception automobile de demain", conférence invitée, Séminaire "L'industrie automobile dans le Grand Est : défis d'hier, d'aujourd'hui et de demain" organisé par l'UTBM / RECITS et le Préci, 10 Juillet 2007, Sévenans.

## 5. RAPPORTS DE CONTRATS DE RECHERCHE

- [Ra.1] **E. Bonjour**, P. Baptiste, Audit d'une Base de Données Techniques et d'une GPAO, société SOCOP Industries, compte-rendu de l'audit, 40 p., mars 1995.
- [Ra.2] **E. Bonjour**, P. Baptiste, Audit de la gestion de production de la société RICAL SA, contrat industriel, rapport : 35 p., janvier 1996.
- [Ra.3] O. Barakat, **E. Bonjour**, O. Grunder, F. Lhote, G. Vallet, "Enquête sur la diffusion de la gestion par projet dans les Entreprises Franc-Comtoises", Rapport Technique IP-97-06 :

Compte rendu d'une opération de recherche financée par le Ministère de l'Industrie, de la Poste et des Télécommunications, mai 1997.

- [Ra.4] **E. Bonjour**, F. Lhote, M. Dulmet, G. Mercier, "Activités et compétences", Projet de Recherche. Cahier des Charges de la phase de cadrage, Annexes : cadre conceptuel et démarche scientifique, contrat PSA, septembre 1999, 40 p.
- [Ra.5] **E. Bonjour**, P. Chazelet, M. Dulmet, F. Lhote, G. Mercier, "Activités et compétences", Rapport de la phase de cadrage, contrat PSA, novembre 1999, 18 p.
- [Ra.6] **E. Bonjour**, M. Dulmet, G. Mercier, F. Lhote, "Cahier des Charges, Objectifs de recherche de la phase pilote", Contrat PSA, janvier 2001, 15 p.
- [Ra.7] **E. Bonjour**, M. Dulmet, G. Mercier, F. Lhote, "Rapport intermédiaire de la phase pilote", Contrat PSA, juillet 2001, 39 p.
- [Ra.8] **E. Bonjour**, M. Dulmet, G. Mercier, B. Bonnamour, "Activités et Compétences de Conception", Rapport Final de la phase pilote : Synthèse et Annexes, Contrat PSA, Février 2002, 110 p.
- [Ra.9] M. Dulmet, **E. Bonjour**, "Modélisation et Pilotage des systèmes de compétence d'ingénierie", Bilan de JEM STIC CNRS créée en Octobre 2001, 2 pages, novembre 2002.
- [Ra.10] **E. Bonjour**, M. Dulmet, JP Micaelli, "Cahier des Charges, Objectifs de recherche de la phase de développement", Contrat PSA, Octobre 2002, 20 p.
- [Ra.11] **E. Bonjour**, M. Dulmet, JP Micaelli, Rapport Intermédiaire de la phase de développement, Contrat PSA, Juin 2003, 94 p.
- [Ra.12] **E. Bonjour**, M. Dulmet, JP Micaelli, Rapport final de la phase de développement, Contrat PSA, février 2004, 50 p.
- [Ra.13] **E. Bonjour**, M. Dulmet, JP Micaelli, "Cahier des Charges, Objectifs de recherche de la phase IV dite "Extensions de la recherche et applications" ", Contrat de recherche PSA Peugeot Citroën –LAB-Récits, août 2004, (Rédaction du document de mise en projet en décembre 2004, accepté en janvier 2005), 35 p.
- [Ra.14] **E. Bonjour**, G. Harmel, JP Micaelli, M. Dulmet, "rapport intermédiaire de la phase IV dite "Extensions de la recherche et applications" ", Contrat de recherche PSA Peugeot Citroën – LAB-Récits, décembre 2005, 59 p.
- [Ra.15] **E. Bonjour**, G. Harmel, JP Micaelli, M. Dulmet, "rapport final de la phase IV dite "Extensions de la recherche et applications" ", Contrat de recherche PSA Peugeot Citroën, LAB et Récits, mai 2006, 104 p.
- [Ra.16] JP. Micaelli, **E. Bonjour**, S. Deniaud, "projet de recherche amont : A2P-Num, Architecture Produit-Process, dans un environnement collaboratif et NUMérique", novembre 2006, pôle Véhicule du Futur, 18 p.

## 6. RAPPORT D'ACTIVITE COLLECTIVE

- [Ra.17] E. Caillaud, **E. Bonjour**, "Bilan et perspectives du GT C2EI de l'axe conception du GDR MACS", mai 2007, 5pages.

## **Partie III. Contributions à l'instrumentation du métier d'architecte système : de l'architecture modulaire du produit à l'organisation du système de conception - positionnement et problématique**

Notre recherche a pour objectif de contribuer à une instrumentation du métier d'architecte système. Cette recherche finalisée s'inscrit dans un domaine émergent, l'Ingénierie Système (IS). En effet, les premiers travaux pour conceptualiser le métier d'architecte et pour développer des outils supportant ses activités complexes remontent au milieu des années 1990. En France, l'un des premiers ouvrages de référence a été écrit par JP Meinadier [1998], en 1998. L'Association Française de l'Ingénierie Système (AFIS) a été créée en 1999 par un ensemble de grands groupes industriels, avec pour but de faciliter les échanges de pratiques et de diffuser des modèles, méthodes et normes liés à l'IS. L'AFIS souhaite aujourd'hui rapprocher les préoccupations industrielles avec des thèmes de recherche concernant l'IS.

Cependant, envisager une recherche dans le contexte de l'IS n'est pas aisé. Ce domaine de recherche est en construction et nécessite de maîtriser des champs disciplinaires variés et une approche globale des systèmes, avec des aspects à la fois méthodologiques et organisationnels.

Nous avons choisi d'organiser notre recherche autour des trois points suivants :

- Une analyse des activités d'ingénieurs ou architectes systèmes, travaillant sur des projets d'innovation et conception de nouveaux systèmes mécatroniques,
- Une collaboration avec des chercheurs d'autres disciplines (Sciences cognitives, Sciences de gestion, Sciences économiques) pour appréhender ces activités sous différents points de vue, tout en conservant nos contributions dans notre propre domaine scientifique des Sciences et Techniques de la Production,
- Une volonté de développer des outils d'aide à la décision visant l'amélioration des performances des activités de l'architecte système.

La présente partie est structurée en trois chapitres.

Le Chapitre 1 (p. 42) présente la conception comme une activité en mutation, de plus en plus complexe.

Le Chapitre 2 (p. 50) propose une structuration des thèmes de recherche en conception et permet un premier positionnement de notre recherche.

Le Chapitre 3 (p. 56) développe notre problématique de recherche qui vise à coupler une activité technique, identifier l'architecture d'un système et une activité organisationnelle, concevoir l'organisation du système de conception.

## Chapitre 1. Une activité de conception en mutation

Les travaux de recherche que nous avons menés recouvrent deux grands thèmes des Sciences et Techniques de la Production, à savoir le développement de modèles, méthodes et outils pour l'aide à la conception de systèmes mécatroniques et pour l'aide au pilotage des activités de conception.

Avant de positionner nos contributions dans ces deux thèmes généraux, nous allons d'abord retracer les évolutions majeures, technologiques et organisationnelles, qui ont marqué les activités de conception lors de ces deux dernières décennies.

### 1.1. *Complexification des exigences de conception*

Depuis plusieurs années, de nombreux chercheurs et industriels notent que la complexité des produits ne cesse d'augmenter, pour satisfaire au mieux les exigences croissantes provenant des différents acteurs du cycle de vie du produit (dont les clients, la production, la maintenance, le recyclage, les organismes de normalisation ...). Dans une formulation idéale du problème de conception, elles devraient être indépendantes. Dans la réalité, elles sont souvent interdépendantes et présentent même des aspects antinomiques. Les concepteurs doivent aussi faire face au défi du développement durable qui nécessite d'intégrer de nouvelles valeurs et contraintes environnementales, sociales et sociétales.

Dans un projet de conception, les exigences sont rarement connues complètement dès le début du projet. Si les premières phases du projet visent à améliorer la définition des exigences, les phases suivantes peuvent être perturbées par des évolutions imprévues. En effet, les besoins des clients peuvent évoluer ou avoir été mal perçus ou mal traduits en termes d'exigences techniques, les normes peuvent devenir plus sévères, la politique industrielle peut être remise en cause, Etc.

Face à cette double difficulté liée à l'incomplétude et à l'incertitude de la formulation du problème de conception, les activités de conception se complexifient avec des organisations rationalisées permettant de confronter au plus tôt les attentes et points de vue des différents acteurs. La gestion des modifications et des configurations joue un rôle majeur pour enregistrer et partager des informations à jour entre tous les acteurs du projet de conception.

### 1.2. *Complexification des systèmes mécatroniques*

La complexité croissante des systèmes mécatroniques qui nous entourent est une réalité, dans tous les domaines d'activité, que ce soit dans l'aéronautique, l'automobile, la téléphonie, l'informatique, l'électroménager ... Les systèmes sont conçus pour satisfaire soit des fonctions nouvelles, soit des critères plus exigeants, soit pour réduire les effets néfastes liés au fonctionnement du système (comme par exemple, l'émission de bruit pour un aspirateur ou un véhicule). Ils doivent pouvoir répondre aux exigences de personnalisation qu'attendent les clients. Les améliorations des produits sont possibles grâce aux rapides évolutions technologiques, qui se manifestent par de nombreuses innovations et surtout des mutations dans les métiers de la conception. Nous pouvons citer, par exemple, dans les véhicules, les fonctions d'antiblocage au freinage (ABS), de contrôle de stabilité (ESP), la suspension hydraactive, l'aide au stationnement, la vision de nuit, les systèmes de sécurité proactive avec une "route intelligente", le GMP hybride, Etc.

### 1.3. *Complexification des modèles, méthodes et outils d'aide à la conception*

Pour maîtriser cette complexité croissante, de nouveaux modèles, méthodes et outils ont été développés. Nous présentons dans cette partie les points saillants de ces évolutions.

#### 1.3.1. **De nouvelles méthodes de conception**

Selon B. Yannou [Yannou 2001], le terme "méthodes de conception" recouvre, dans la communauté anglo-saxonne, deux domaines différents :

- le domaine des "design theories and methodologies" qui consiste à définir les fondements d'une science de la conception et
- le domaine des méthodes industrielles qui sont largement utilisées aujourd'hui dans les entreprises manufacturières ; elles supportent différentes activités de conception assurant des résultats acceptables à des coûts maîtrisés.

Parmi les méthodes industrielles, nous pouvons citer les plus connues : l'Analyse Fonctionnelle (AF), l'Analyse de la Valeur (AV), l'Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC), le Quality Function Deployment (QFD), la méthode d'innovation TRIZ.

Le domaine des "design theories and methodologies" est né de la volonté de conceptualiser l'activité de conception qui était plutôt vue avant les années 70 comme l'activité d'un "homme de l'art". Cette recherche a commencé en Angleterre puis aux Etats-Unis et en Allemagne. Quelques chercheurs en conception ont théorisé leurs pratiques et savoirs dans des ouvrages de référence [Pahl et Beitz, 1984, 1996 ; Suh, 1990 ; Baldwin et Clark, 2000 ; Ulrich et Eppinger, 2000].

Ces travaux concernent l'analyse de l'activité de conception afin d'interpréter sa complexité et de proposer à la fois des modèles théoriques facilitant sa compréhension et des méthodes de conception guidant les concepteurs dans leurs activités.

Nous pouvons mentionner quelques travaux, tels que

- la théorie C-K de [Hatchuel et Weil, 2002] qui considère le raisonnement de conception comme une co-évolution par interactions d'un espace de concepts et d'un espace de connaissances,
- l'approche artificialiste de la conception [Simon, 1997<sup>19</sup> ; Micaëlli et Forest, 2003],
- les aspects collaboratifs en conception [Sonnenwald 1996] ...

Nous allons présenter par la suite uniquement les deux approches les plus connues, à savoir la conception axiomatique ("Axiomatic Design") de Suh [Suh 1990] et la conception systématique ("Systematic Design") de Pahl et Beitz [Pahl et Beitz, 1984, 1996]. Ces approches techno-centrées ont grandement contribué à rationaliser les activités techniques de conception, leur coordination et l'élaboration d'architectures satisfaisantes des produits.

Dans le Chapitre 4, nous présenterons les principes de la conception modulaire qui sont sous-jacents aux travaux de Suh et qui ont été décrits partiellement par Pahl et Beitz [1996, pp 433-453]. Ulrich et Eppinger ont également fortement contribué au développement de la conception modulaire [Ulrich, 1995], [Ulrich et Eppinger, 2000, pp181-206], [Eppinger et Salminen, 2001], [Pimmler et Eppinger, 1994] en proposant des outils et méthodes d'identification d'architecture modulaire. D'autres méthodes ont été développées sous l'acronyme "DFx" pour "Design For x", x pouvant être la fabrication, la maintenance, le démantèlement, Etc [Lindemann 2007]. Nous ne les présenterons pas car elles ne sont pas au centre de nos travaux sur les architectures.

---

<sup>19</sup> La première version date de 1969.

### 1.3.1.a. La conception axiomatique

La conception axiomatique [Suh 1990] considère le processus de conception comme un cheminement séquentiel et itératif (dit en zig-zag) entre quatre espaces : le domaine client, le domaine fonctionnel, le domaine physique et le domaine des processus de réalisation. Un formalisme matriciel permet de relier un domaine à un autre. A titre d'exemple, la représentation matricielle en Figure 6 illustre le couplage entre le domaine fonctionnel (Functional Requirements, FR) qui comprend les fonctions du système, et le domaine physique (Design Parameter, DP) qui comprend ses paramètres de conception. Les fonctions, tout comme les paramètres de conception, sont associées à des dimensions mesurables. Pour une fonction  $DF_i$ , le coefficient  $A_{ij}$  exprime la contribution du paramètre de conception  $DP_j$  à la valeur de  $DF_i$ .

A	DP1		DPj		DPn
FR1					
FRi					
FRn					

Figure 6: Exemple de matrice de couplage

La méthode s'appuie sur deux axiomes : l'axiome d'indépendance et l'axiome d'information.

Le premier axiome aide à la création d'une architecture de développement des produits et stipule qu'une conception optimale ne doit pas créer de couplage dans la réalisation des fonctions (indépendance) au travers de la structure. Ainsi, dans une conception satisfaisante, les DP et les FR sont couplés de telle façon qu'un DP donné puisse être ajusté pour satisfaire son FR correspondant, sans affecter les autres FR (indépendance fonctionnelle). La robustesse de l'architecture est assurée lorsqu'une perturbation dans le domaine physique n'affecte qu'une seule fonction. Atteindre simultanément l'optimum de plusieurs fonctions est plus aisé lorsqu'on peut jouer indépendamment sur le réglage des paramètres structurels (les DP). Ainsi, il est préférable d'avoir une matrice A diagonale, éventuellement triangulaire.

Le deuxième axiome aide à l'évaluation de la qualité de la conception. Il stipule qu'une conception est globalement optimale si elle nécessite un minimum d'information. Les concepteurs peuvent mesurer la probabilité de succès du produit conçu, mais aussi sa complexité.

### 1.3.1.b. Le modèle du processus de conception de Pahl et Beitz

Dès le début des années 90, des travaux de recherche ont été lancés pour développer des méthodes de conception systématique des systèmes mécaniques, reposant sur de nouveaux modèles du processus de conception.

En Allemagne, Pahl et Beitz ont fait partie de différents groupes d'ingénieurs allemands (VDI - Verein Deutscher Ingenieure : Association d'ingénieurs allemands) élaborant des directives ("*Richtlinie*") portant sur des méthodes de développement de produits mécatroniques. Très productifs, ces groupes ont proposé différents modèles du processus de conception, en particulier, selon le type de produits [VDI 2221 ; VDI 2206].

Dans leur ouvrage, [Pahl *et al.*, 1996] ont proposé un modèle théorique structurant le déroulement progressif du processus de conception. Ce modèle qui comporte quatre phases a prouvé son efficacité et a été pris comme base de référence par différentes entreprises et centres de recherches et développement.

Un autre modèle du processus de développement de produit, moins connu que le précédent, est aussi très intéressant pour décrire les tâches critiques en conception (Figure 7). Il permet de situer

l'élaboration de l' "architecture fonctionnelle" et de l' "architecture de modules"<sup>20</sup> et leur amélioration, leur raffinement dans les phases préliminaires de conception de principe (phases 1, 2, 3) et de conception d'ensemble (phases 4, 5, 6, 7).

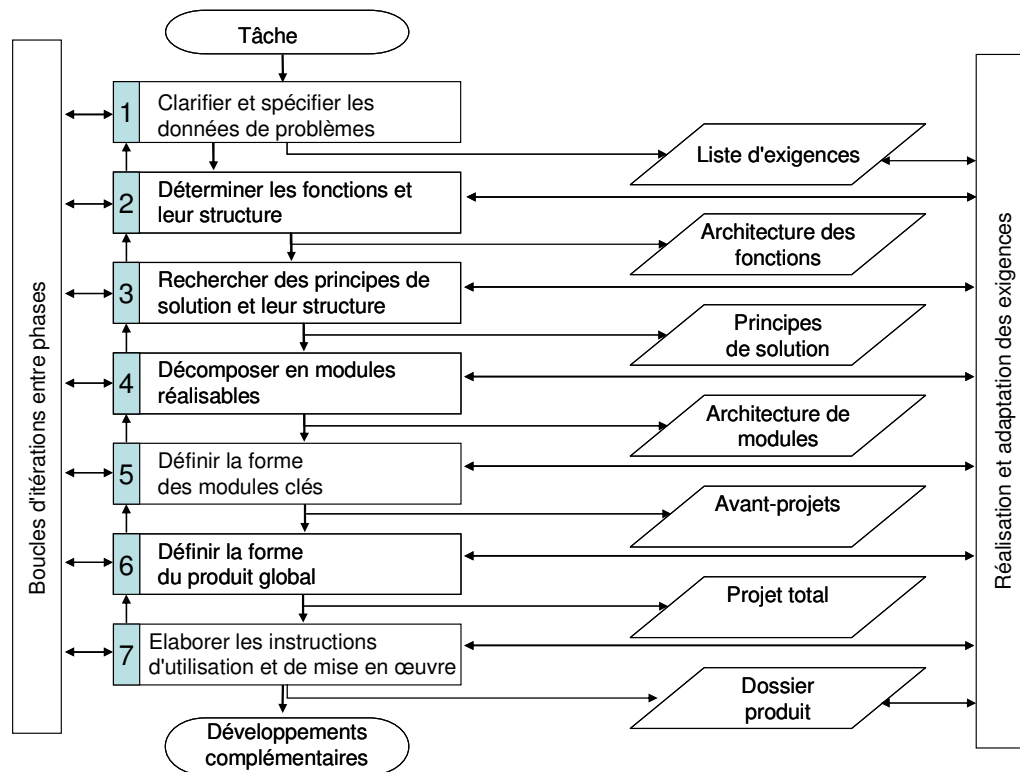


Figure 7: Processus de développement de produits (d'après VDI 2221)

### 1.3.2. De nouveaux outils de conception

En parallèle au développement de nouvelles méthodes de conception, de nouveaux outils informatiques ont vu le jour pour supporter les activités clés de la conception et pour faciliter la collaboration entre les concepteurs. Ces outils s'appuient sur différents modèles du produit (fonctionnel, structurel, comportemental, géométrique, ...) ou du processus. A titre d'exemple, les fonctionnalités suivantes sont aujourd'hui bien instrumentées :

- gestion et traçabilité des exigences<sup>21</sup>,
- gestion de la configuration<sup>22</sup>,
- modélisation dynamique du système par les scénarios de sollicitations entre objets (diagramme de séquences) et par des diagrammes état-transition (statecharts de Harel) ou d'enchaînement d'activités (FFBD simplifiés).<sup>23</sup>
- modélisation géométrique et paramétrique<sup>24</sup>
- calculs et calculs propres à différentes disciplines<sup>25</sup> ou encore,
- gestion des flux d'informations<sup>26</sup>, Etc.

<sup>20</sup> Les termes originaux sont "Funktionsstrukturen" et "Modulare Strukturen".

<sup>21</sup> Par exemple, DOORS ERS développé par Telelogic ou SmarTeam/CSE développé par Dassault-Systèmes (IBM/PLM distributeur)

<sup>22</sup> ISO 10007:2003 – "Systèmes de management de la qualité - Lignes directrices pour la gestion de la configuration"

<sup>23</sup> Par exemple, Statemate : I-Logix

<sup>24</sup> Par exemple, Catia V5 ou ProEngineer

<sup>25</sup> Par exemple, NX Nastran (en RdM/vibration), Fluent (en mécanique des fluides et thermo-mécanique) ou Matlab/Simulink (pour la détermination des lois de contrôle-commande)

## 1.4. Complexification des organisations et des modes de pilotage

En raison des exigences de plus en plus diverses et sévères à prendre en compte, des outils et des méthodes nouvelles à utiliser, des collaborations nombreuses avec des points de vue différents internes ou externes à l'entreprise ... les activités de conception se complexifient fortement. Face à cette complexification, les organisations et leur pilotage se sont également complexifiés.

Dans cette partie, nous montrons d'abord que les entreprises ont du adopter de nouvelles organisations dans lesquelles les acteurs et les clients ont retrouvé une place centrale. Une attention particulière a été portée sur la nature des activités. Des projets d'innovation sont alors lancés et synchronisés avec des projets de développement. Les premiers visent, par exemple, à maîtriser une nouvelle technologie, valider un nouveau concept d'architecture. Les seconds visent alors à intégrer des solutions relativement maîtrisées. Enfin, le besoin de réduire les délais de conception et de limiter les retours-arrière liés à un manque de communication entre des métiers différents a incité les entreprises à s'organiser selon les principes de l'ingénierie intégrée.

Nous présentons succinctement comment ces changements organisationnels se sont accompagnés d'une évolution des modes de pilotage du système de conception (métiers, projets, communautés, ...) pour répondre à de nouveaux **impératifs d'agilité des organisations**.

Enfin, nous introduisons l'ingénierie système comme étant une réponse globale aux problèmes de complexification de la conception.

### 1.4.1. De nouvelles organisations

#### 1.4.1.a. Prise de conscience de la place centrale des acteurs

La recherche de performance impose à l'entreprise plus de flexibilité dans son organisation de travail, une meilleure maîtrise des technologies émergentes mais surtout une meilleure considération de ses ressources humaines. En effet, les entreprises ont longtemps considéré la technologie comme le principal vecteur de progrès et de performance. Les formes organisationnelles découlant de ce mode de raisonnement étaient figées et traitaient la ressource humaine au même titre que les autres ressources matérielles. Ce paradigme a montré ses limites depuis les années 80. Tous les acteurs, industriels et scientifiques, s'accordent à dire aujourd'hui que la création de la valeur et l'obtention de la performance ne peuvent se faire sans l'implication de l'ensemble des acteurs de l'entreprise, détenteurs de connaissances et développant leurs compétences individuelles et collectives.

#### 1.4.1.b. Le management par les processus

L'approche processus, recommandée par les normes ISO 9000 version 2000 vise à décloisonner les différents services (ou départements, unités, ...) de l'entreprise, à privilégier la satisfaction des clients et ainsi à la rendre plus agile et plus compétitive [Cauvin 2005]. Elle consiste à remettre en cause le découpage fonctionnel classique, dans laquelle la réponse aux exigences des clients et la rapidité des flux sont souvent négligées, pour proposer une organisation orientée vers le client et vers la production de valeur ajoutée. Un processus est alors qualifié de transversal puisqu'il se déroule du besoin du client jusqu'à sa satisfaction, en s'appuyant sur un ensemble d'activités impliquant les métiers de base (ou pôles de compétence).

La philosophie des nouvelles normes est en rupture avec celle qui dominait auparavant. Il ne s'agit plus d'écrire ce que l'on va faire mais de justifier que l'on saura faire, qualitativement et quantitativement. Le management des compétences est alors fortement recommandé, appuyé sur une approche processus de l'entreprise.

---

<sup>26</sup> Outils de type *Product Lifecycle Management (PLM)*



#### 1.4.1.c. Des organisations adaptées au type de conception

Des auteurs ont proposé de distinguer trois types de conception selon l'objectif, la disponibilité des connaissances au début du projet, la structuration du plan d'action et le degré d'autonomie et de créativité du concepteur [Perrin, 1999] : la conception routinière, la conception innovante et la conception créative. Dans la réalité, la distinction entre ces trois types de conception n'est pas toujours évidente.

Par exemple, un projet de conception automobile peut intégrer le résultat de sous-projets de conception de modules. A un sous-projet de conception innovante correspond alors une alternative moins risquée de conception routinière, qui revient à adapter une solution existante, pour limiter les risques d'échec du projet global.

Les entreprises ont ainsi restructuré leurs processus de développement avec une séparation entre les activités innovantes et les activités routinières. Le rôle du management est alors d'assurer la synchronisation entre différents projets [Midler 1993] et de maîtriser les risques liés à des alternatives innovantes.

Wheelwright and Clark [1992] ont présenté une typologie d'organisation de projet avec un continuum entre une organisation classique par départements fonctionnels et une organisation par projet autonome : "*functional*", "*lightweight*", "*heavyweight*", "*autonomous*". Ils recommandent ensuite le choix d'un type d'organisation en fonction du type de connaissances requises par la conception du produit ou le type d'architecture du produit. Si les connaissances sont hautement spécialisés ou l'architecture très modulaire, alors les organisations de type "*functional*" ou "*lightweight*" sont préférables. Ceci permet de développer des expertises relatives à un domaine technologique ou relatives à une fonction et aux composants associés. Dans le cas où l'architecture du produit est plus complexe, les organisations de type "*heavyweight*" et "*autonomous*" sont recommandées.

Browning [1999] a développé une approche systématique pour la conception des organisations en conception. Cette approche se base sur les interactions entre les composants d'un produit pour mieux comprendre les interactions (ou dépendances) susceptibles d'exister entre les équipes d'un projet. Il définit alors les notions d'équipe système (*system team*) et d'équipe de produit intégrée (*Integrated Product Team*), dans le cas de grands projets. Une "équipe de produit intégrée" est définie comme un ensemble de concepteurs trans-fonctionnels qui ont la responsabilité de concevoir un sous-système ou un composant du système. Une équipe système se décompose en plusieurs équipes de produit intégrées.

#### 1.4.1.d. L'ingénierie intégrée

L'ingénierie intégrée (ou Concurrent Engineering, notée par la suite CE) [Prasad, 1997], dite aussi ingénierie simultanée ou concourante [Midler, 1993] ou encore congruente [Trassaert, 2002] est apparue au milieu des années 80 comme une nouvelle forme d'organisation en conception. Elle répond à un besoin d'amélioration de la compétitivité des entreprises, qui doivent développer leur produit et son système de production, toujours plus rapidement, moins cher et avec une assurance de qualité. Deux grands principes sont mis en œuvre : la simultanéité et l'intégration. Le premier consiste à réaliser en même temps différentes activités concourant à la conception du produit et de son système de production, le second est caractérisé par l'établissement d'une interdépendance entre les différentes phases du projet, par la prise en compte, à chaque phase du développement, des considérations relatives à l'ensemble du cycle de vie du produit, depuis sa conception jusqu'à sa mise à disposition (coût, qualité, délai, besoins du consommateur...). Quand la conception du produit atteint un certain stade, des informations préliminaires sont transmises aux concepteurs du système de production et la conception commence dès que possible. Finalement, le projet de conception d'un produit complexe (tel un véhicule) est lui même complexe car son organisation se construit graduellement en fonction des informations et des contraintes très variées, évolutives et incertaines qui sont traitées progressivement par les acteurs du projet.

Aux organisations séquentielles, cloisonnées par de fortes hiérarchies et spécialisations, ont succédé les plateaux projets, des groupes de travail collaboratif ad hoc et le co-développement avec des partenaires extérieurs, modifiant ainsi les frontières du processus de conception.

#### 1.4.2. De nouveaux modes de pilotage

Le pilotage d'un système sociotechnique s'intéresse à tous les processus et moyens mis en œuvre par ce système pour garantir le maintien, voire l'amélioration, de sa performance et son adaptation par rapport aux changements de l'environnement.

Les concepts relatifs au pilotage des organisations évoluent. Les entreprises souhaitent améliorer l'agilité de leurs organisations [Cauvin 2005 ; Boucher 2007], en donnant une importance plus forte aux acteurs collectifs qui la constituent, en favorisant l'autonomie et l'auto-organisation.

O. Senéchal [Senéchal 2004] définit la "performance globale d'un système comme étant l'obtention conjointe de la pertinence, de l'efficacité, et de l'efficacités, appréciées en termes de coûts et de valeur, sur l'intégralité du cycle de vie du système."

La **pertinence** est une propriété fonctionnelle, liée à la finalité. Elle désigne la capacité du système étudié à poursuivre des objectifs permettant de satisfaire les attentes de ses destinataires. La pertinence suppose que le système est ouvert et qu'il est piloté. La réponse du système est pertinente si les objectifs poursuivis sont conformes aux attentes des destinataires.

La **cohérence** est une propriété structurelle. Un système est cohérent si son architecture et son fonctionnement permettent de réaliser les objectifs définis (ou fonctions). La cohérence est souvent associée à l'optimisation de l'utilisation des ressources du système. Ainsi la dialogie pertinence / cohérence correspondrait à la recherche d'amélioration permanente du couple habituel valeur / coût.

Aujourd'hui, les nouvelles exigences de performance, exprimées en termes d'innovations organisationnelles, de réactivité, de proactivité, ou d'agilité [Boucher, 2007], imposent un système de pilotage qui se préoccupe de faire évoluer rapidement les organisations, que ce soit en conception, en production ou dans un réseau d'entreprises, pour améliorer la performance globale de l'entreprise.

### 1.5. Une réponse globale : l'Ingénierie Système (IS)

L'ingénierie Système (IS) est une méthodologie interdisciplinaire, dont le but est de formaliser et de maîtriser les processus de conception, de réalisation et d'intégration de systèmes complexes (produits, systèmes de production...). Les principes de l'ingénierie simultanée peuvent être mis en œuvre dans le cadre de cette démarche. Différentes normes relatives à l'Ingénierie Système coexistent, par exemple [IEEE 1220], [ISO 15288]. Elles décrivent en termes de processus et d'activités génériques, d'une part, des principes d'organisation des projets et d'autre part, des pratiques jugées bonnes dans les métiers associés. Elles ont des champs d'application ou des approfondissements limités mais se complètent. Parmi les faits marquant l'histoire de l'IS, nous pouvons mentionner la constitution en 1990 de INCOSE (International Council on Systems Engineering) et en 1999, de l'AFIS (Association Française d'Ingénierie Système).

Selon l'AFIS<sup>27</sup>, l'Ingénierie Système est une démarche méthodologique générale qui englobe l'ensemble des activités adéquates pour concevoir, faire évoluer et vérifier un système apportant une solution économique et performante aux besoins d'un client tout en satisfaisant l'ensemble des parties prenantes. Cette démarche permet d'intégrer les contributions de toutes les disciplines

---

<sup>27</sup> <http://www.afis.fr/>

impliquées dans les phases de conception et d'intégration d'un système, en tenant compte des différentes exigences des parties prenantes (besoins, contraintes) intervenant au cours des différentes phases du cycle de vie d'un système (point de vue utilisateur). Grâce à la mise en œuvre systématique et coordonnée d'un ensemble de processus génériques par des équipes multidisciplinaires, l'IS permet la conception équilibrée d'une solution satisfaisant ces exigences, ainsi que des objectifs du projet en termes de coûts, délais, risques... (point de vue du concepteur). Dans le cadre du développement d'un produit et de ses systèmes associés (système de conception, système de production, système de maintenance, ...), les buts de cette démarche sont de décomposer un système complexe sur différentes strates, d'identifier et d'organiser les activités techniques, d'éviter les retours arrière tout en progressant avec assurance (gestion des risques et de la maturité de la conception sur chaque strate), de maîtriser les informations nécessaires à la réalisation et ainsi de réduire les délais et coûts de développement.

## 1.6. *Premier positionnement de notre projet*

Face à la complexité croissante des systèmes mécatroniques, les entreprises doivent s'approprier de nouvelles méthodes et outils de conception. Elles doivent adapter voire innover dans l'organisation de leur système de conception. Celui-ci n'est plus uniquement interne à l'entreprise puisqu'une part importante des activités de conception peut être réalisée de façon collaborative avec des fournisseurs ou des clients.

Nous positionnerons cette problématique au niveau international dans le Chapitre 3, § 3.3. Si on se limite à la communauté française, notre projet de recherche s'inscrit dans le cadre de la recherche sur les Sciences et Techniques de la Production. Plusieurs HDR récentes ont apporté une contribution à cette problématique générale :

- B. Yannou [2001] a travaillé sur les méthodologies de conception, l'aide à la décision multicritère et la spécification fonctionnelle en conception préliminaire.
- D. Deneux [2002] a positionné ses travaux sur les méthodes et modèles pour la conception intégrée (formalisation des connaissances et modélisation du produit par "features").
- O. Sénéchal [2004] a approfondi le thème de la modélisation et l'évaluation des performances des processus de conception et d'innovation.
- A. Cauvin [2005] a défini une problématique liée à la réactivité dans les situations de conception et au pilotage des processus décisionnels.
- C. Baron [2005] a orienté ses travaux sur l'évaluation dans la conception système et sur le couplage nécessaire entre la spécification du produit et la conduite de projet.
- Le Coq [2007] a travaillé sur des méthodologies en conception de produits permettant d'intégrer les métiers pluridisciplinaires dans le processus de conception, de développer des outils métiers et ensuite de les déployer efficacement.
- X. Boucher [2007] a défini une problématique sur le pilotage de l'agilité des organisations. En particulier, il propose de doter les entreprises de méthodes de diagnostic des systèmes de compétences, et d'anticipation des effets de leur évolution.

Notre projet se rapproche des trois dernières HDR et s'en démarque de par :

- son positionnement original sur l'architecture modulaire, considéré comme une approche pertinente pour la conception d'un produit ou d'une organisation d'un projet,
- le couplage recherché entre l'architecture du produit et celle de l'organisation d'un projet,
- la prise en compte des systèmes de compétences dans le pilotage du système de conception.

## Chapitre 2. Une structuration de la recherche en conception

Devant les enjeux importants liés aux activités de conception, de nombreux travaux de recherche prennent pour objet le développement de théories, modèles et méthodes permettant l'amélioration de leur performance.

Ceux-ci s'intéressent à différents aspects de cette activité : quelle est sa nature ? Qui en sont les acteurs ? Quels sont les outils ou les modèles dont le concepteur a besoin pour la mener à bien voire l'améliorer ? Comment est-elle structurée ? Pilotée ? Évaluée ? Quels seraient les outils ou modèles susceptibles d'améliorer la pertinence et la cohérence des organisations de conception sur des dimensions comme la qualité, l'efficacité (réduction du coût, des délais et des risques de développement), l'innovation, l'agilité, etc. ?

Les caractéristiques de la conception ont été mises en évidence par plusieurs chercheurs [De Terssac *et al.*, 1996 ; Simon, 1997 ; Perrin, 1999 ; Micaëlli et Forest, 2003] ... Dans la thèse de F. Belkadi, nous avons présenté les principales caractéristiques. Nous insistons sur les trois caractéristiques suivantes de l'activité de conception :

- elle consiste en une construction progressive des prescriptions et des résultats, qui correspondent à des représentations du produit ;
- de part la complexité du produit à concevoir, elle requiert de nombreuses coopérations et se construit dans un "rapport de prescriptions réciproques" [De Terssac *et al.*, 1996], avec de nombreux échanges et partages d'informations ;
- elle est mobilisatrice et génératrice de connaissances et de compétences variées.

Une conséquence de la complexité de l'activité de conception est que cette activité est rarement individuelle mais présente un caractère collectif avec des interdépendances souvent fortes entre des acteurs qui proviennent d'univers disciplinaires différents et la nécessité d'intégrer de multiples points de vue (cognitif, technique, social, économique, organisationnel, ...).

Répondre à cette complexité nécessite le développement de méthodes et d'outils afin d'aider les concepteurs à améliorer les performances de leurs activités.

Les thèmes traités par les chercheurs du domaine sont si variés qu'il est impossible de tous les aborder. Aussi limiterons-nous notre étude bibliographique aux travaux du domaine des Sciences et Techniques de la Production. La structuration des différentes thématiques<sup>28</sup> est présentée dans la Figure 8. Nous ne prétendons pas à une exhaustivité des thèmes retenus. De nombreux travaux de recherche concernent une combinaison de ces thématiques.

Même restreint, notre champ de recherche bibliographique reste large, puisque de nombreux théoriciens, écoles, courants de recherche, etc., visent à proposer une aide au concepteur opérationnel, dans son activité technique de conception (multiples représentations du produit, flux d'informations avec des collaborateurs, aide à la décision, gestion des connaissances), et au chef de projet, dans son activité de pilotage des activités (choix stratégique, conception de l'organisation et gestion de projet, pilotage des systèmes de compétences).

---

<sup>28</sup> Pour aboutir à cette classification des thématiques de recherche en conception, nous avons utilisé les caractéristiques principales de la conception comme critère de classification.

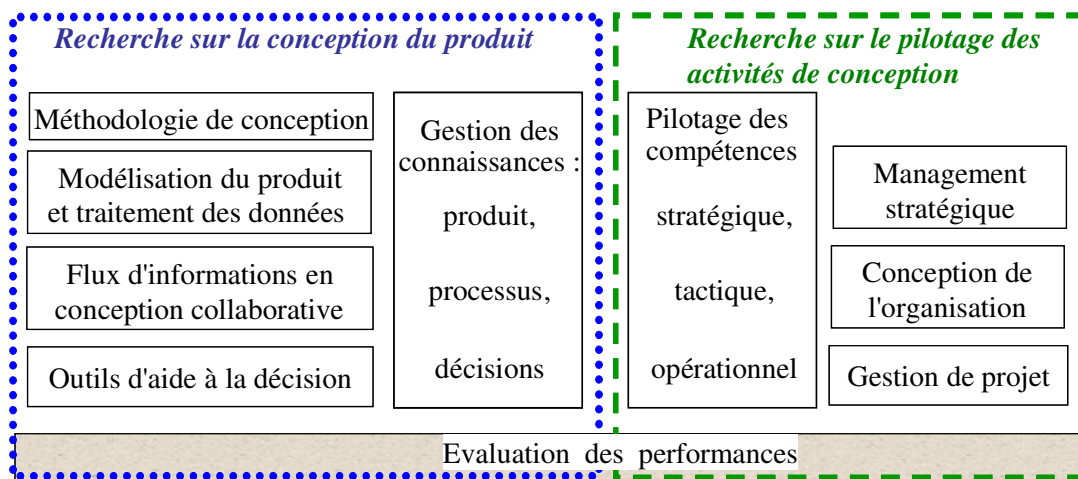


Figure 8 : Différents thèmes de recherche en conception

## 2.1. Recherche sur la conception de produit

La catégorie "recherche sur la conception de produit" (et de ses systèmes associés, au sens de l'Ingénierie Système) vise à fournir une aide à l'**activité technique du concepteur**.

### 2.1.1. Méthodologies de conception

Nous avons déjà présenté des travaux concernant les théories et méthodologies de conception dans la section 1.3.1. Ce thème qui est au cœur du groupe de travail "*Design Theory and Research Methodology*" de la "*Design Society*" nécessite encore des approfondissements pour permettre d'asseoir la conception sur une théorie, des méthodes et des outils appropriés aux diverses situations industrielles. En particulier, notons que des travaux récents proposent des méthodes de conception adaptées aux micro-systèmes, allant jusqu'à adapter les principes de l'ingénierie système [De Grave, 2004 ; Watty et Binz, 2007].

Une partie de cette recherche s'intéresse à définir une méthode de recherche pertinente pour analyser et théoriser la conception [Micaelli et Forest, 2003].

### 2.1.2. Modélisation du produit et traitement des données

Les concepteurs ont besoin d'outils de modélisation du produit et de traitement des données correspondantes. Pour les chercheurs, il s'agit de développer des supports techniques adaptés à la spécificité de chaque activité de conception. Dans le domaine de l'ingénierie de la conception, ce thème est très vaste (Modèles fonctionnels, modèles CAO, FAO, "Virtual factory" ...) et peut se chevaucher avec le suivant sur les "flux d'informations en conception collaborative".

Ce thème s'intéresse, par exemple, à la gestion de la diversité des produits avec le développement d'outils et méthodes de conception de famille de produits ou encore, à des modèles de représentation du produit [Jiao *et al.* 2007 ; Zha et Sriram, 2006], que ce soit pour concevoir son architecture (représentations par des matrices, par graphes ...) ou que ce soit pour optimiser son comportement (représentations multi-physiques, par exemple par Bond-Graph) [Marquis-Favre *et al.*, 2006]. Une méthode connue qui propose des modélisations d'un système sous différents points de vue est la méthode SAGACE, développée au CEA [Pénalva, 1997].

### 2.1.3. Flux d'informations en conception collaborative

D'autres travaux visent à développer des supports aux flux d'informations en conception collaborative, de type collecticiels, workflows ou CSCW [Gzara-Yesilbas *et al.*, 2006 ; Shen *et al.*, 2006]. Les collecticiels fournissent un environnement informatique partagé pour couvrir l'ensemble des besoins de l'équipe de conception. De nombreux travaux de recherche aujourd'hui se focalisent sur le développement d'outils PLM (Product Lifecycle Management) [Eynard, 2005 ; Keraron *et al.*, 2007] permettant de stocker, partager et faire circuler l'information relative à l'ensemble du cycle de vie du produit. Ils couvrent des fonctionnalités de Gestion Electronique des Données (GED), de définition et gestion des processus (ou workflows) et de gestion de la configuration.

Une attention particulière est portée sur les problèmes d'interopérabilité entre différents logiciels et d'intégration de modèles d'origine différente, en modélisation d'entreprise [Panetto, 2006] ou en conception collaborative [Lombard, 2006]. Actuellement, la communauté de l'Ingénierie Système s'intéresse aux potentialités du langage SysML pour le développement de supports informatiques permettant l'intégration d'activités collaboratives multidisciplinaires.

### 2.1.4. Aide à la décision

De nos jours, tout problème décisionnel complexe fait appel à des points de vue différents et nécessite une prise de décision multicritère où il s'agit de rechercher les meilleurs compromis. L'aide multicritère à la décision apporte à la fois des démarches et des outils. Dans ce thème, nous positionnons des travaux utilisant des méthodes existantes ou fournissant une contribution à des modèles et méthodes d'aide à la décision en conception. Cela recouvre, à la fois des méthodes d'analyse multicritère de type compensatoire comme MAUT (Utilité Multi-attributs) [Keeney et Raiffa, 1976], les opérateurs OWA (Ordered Weighted Average) [Yager, 1988], mais aussi des méthodes de type non compensatoire, comme par exemple, les méthodes ELECTRE I, II ... [Roy et Bouyssou, 1993], Prométhée I et II [Brans, 2002], AHP (Analytical Hierarchical Process) [Saaty, 1990]. D'autres approches hybrides existent comme le formalisme de représentation des préférences des experts [Yannou, 2001] ou comme les Rough Sets (ou ensembles approximatifs), théorie développée par Z. Pawlak [Pawlak, 1982], [Renaud *et al.*, 2003].

Nous avons co-édité, en 2006, un ouvrage qui permet de faire le point sur la recherche nationale concernant l'évaluation et l'aide à la décision, dans les processus de conception [DC.2].

### 2.1.5. Gestion des connaissances

La gestion des connaissances est un thème transversal de la conception technique, car elle doit permettre la traçabilité, la structuration, le partage et la réutilisation de connaissances jugées critiques : modèles de produit (lien avec le thème 2.1.2), modèle des plans d'actions d'un concepteur ou des processus, modèle de la logique de conception (lien avec le thème 2.1.3), notes de réunion, argumentations de prise de décisions (liens avec le thème 2.1.4) [Harani, 1997 ; Ouazzani, 1999 ; Ermine 2002 ; Eynard *et al.* 2004 ; McMahon *et al.*, 2004 ; Lombard, 2006] ... Des méthodes ont été développées pour supporter un cycle de gestion des connaissances. Un état de l'art international est réalisé dans [Zha et Du, 2006].

Nous avons contribué, en 2007, à la rédaction d'un ouvrage faisant le point sur les méthodes permettant de formaliser et gérer le retour d'expérience [DC.4]. Ce concept, qui n'est certes pas nouveau, attire de plus en plus de travaux, dans des domaines variés comme la conception ou la maintenance, en particulier, avec les possibilités offertes par des outils de représentation de la connaissance comme le raisonnement à partir de cas (RàPC).

## 2.2. Recherche sur le pilotage des activités de conception

La deuxième catégorie concerne la "recherche sur le pilotage des activités de conception". Ces travaux fournissent une aide à l'**activité organisationnelle** en conception.

Cette catégorie a fait l'objet d'une attention particulière pour l'amélioration des performances globales des processus de conception [Perrin, 1999 ; Girard et Doumeingts, 2004]. Nous retenons volontairement uniquement trois thèmes structurés selon le niveau décisionnel du pilotage<sup>29</sup> (stratégique, organisationnel et opérationnel) [Génelot, 1992] ainsi que le pilotage des systèmes de compétences. Ce dernier thème est un axe particulier du pilotage global d'un système sociotechnique. Il est ici représenté séparément pour insister sur l'importance qu'il revêt dans le cadre de nos travaux.

Le pilotage se définit habituellement sur 3 niveaux :

- stratégique (formulation de stratégies, identification des compétences stratégiques, etc.),
- tactique ou conception de l'organisation (structuration des processus et des ressources ; affectation des missions aux ressources, etc.) et
- opérationnel ou gestion de projet (planification, motivation des collaborateurs, suivi des indicateurs de performance, détection des écarts, mise en place de mesures correctives, etc.).

### 2.2.1. Management stratégique

Le but du management stratégique est d'augmenter la compétitivité durable de l'entreprise. Ce thème de recherche est largement abordé par les sciences du management. Il s'agit de conceptualiser les prises de décisions stratégiques et de développer des outils d'aide au diagnostic stratégique externe et interne [Meyer et Utterback, 1993 ; Sanchez *et al.*, 1996 ; Fine, 1998, 2005].

Les travaux de Porter [1986] sont parmi les plus connus. Ils fournissent différents modèles et outils d'analyse des forces et menaces d'une entreprise. En particulier, le concept de chaîne de valeur est une approche systématique visant à examiner le développement d'un avantage concurrentiel. Une chaîne se compose d'une série d'activités ajoutant de la valeur. Elles aboutissent à la valeur totale fournie par une entreprise. Les activités de l'entreprise se divisent en deux grandes familles : les "activités principales" et les "activités de soutien". En analysant les sources d'avantages compétitifs, l'entreprise va se concentrer sur les activités qui lui fournissent un avantage stratégique, et identifier les compétences stratégiques qu'elle doit renforcer ou créer.

D'autres travaux relatifs au management stratégique concernent, par exemple, le choix de projets à lancer dans un portefeuille de projets potentiels, la constitution d'un programme de R&D, le besoin de développement de compétences, la prise en compte de la politique industrielle, la décision de lancer une politique de plateforme de produit (segmentation du marché, objectifs de standardisation), les décisions d'outsourcing, Etc.

### 2.2.2. Conception de l'organisation

La conception de l'organisation revient à la construction des structures organisationnelles pour répondre aux objectifs de conception [Galbraith, 1977 ; Gulati et Eppinger, 1996].

Elle consiste à concevoir des systèmes auto-régulés et créer les conditions d'auto-organisation de ce système, c'est-à-dire la capacité du système à s'adapter de lui-même à des phénomènes imprévus [Génelot 1992]. La conception de l'organisation se fait en continu, elle est initialisée à

---

<sup>29</sup> Le terme "planification" est utilisé dans un sens proche en gestion de production et est décliné sur différents niveaux de décisions ou horizons temporels, allant du Plan Industriel et Commercial (long terme) à l'ordonnancement (court terme). Toutefois, l'organisation de la production n'est pas toujours incluse dans la planification.

chaque fois que se posent de nouveaux problèmes, ou des besoins de coordination entre des acteurs hétérogènes [Bouchikhi, 1990]. Une organisation étant un artefact particulier, le processus de conception d'une organisation peut être décrit de la même manière que le processus de conception d'un produit [Micaelli et Forest, 2003]. Certains chercheurs en SHS s'intéressent à l'évolution des compétences et des métiers dans le processus de conception [Midler, 1993 ; Lefebvre *et al.*, 2002].

Des travaux basés sur des représentations matricielles (comme par exemple des DSM, Design Structure Matrix) du produit, des processus et des acteurs ont pour objectif de coupler l'architecture du produit avec l'organisation des acteurs [Sosa *et al.*, 2003].

### 2.2.3. Gestion de projet

La gestion de projet, synonyme de conduite de projet, revient à "conduire l'ensemble des opérations nécessaires à l'étude, au développement et à la réalisation d'un projet" [Midler, 1993]. Pour [Giard, 1991], la gestion de projet traite des décisions opérationnelles et de certaines décisions tactiques durant la préparation et l'exécution du projet. Elle a pour objectif d'apporter à la direction de projet les informations relatives à l'avancement de l'exécution du projet et à tout élément de nature à modifier la programmation du projet ou ses objectifs de délais, coûts et performances. De nombreux travaux portent sur l'ordonnancement de projets, en particulier, en environnement incertain [Herroelen et Leus, 2005].

### 2.2.4. Pilotage des compétences

Le pilotage des compétences concerne l'identification, la structuration et l'évaluation des compétences et des métiers dans les processus de conception [Lefebvre *et al.*, 2002], [Boucher, 1999]. Nous avons co-rédigé un article concernant un état de l'art et des perspectives de recherche sur le pilotage des compétences [RI.4]. Le lecteur pourra s'y reporter pour plus de détails.

La compétence est indissociable de l'activité qu'elle permet de réaliser. Bien piloter les compétences de conception revient d'une part, à avoir une bonne compréhension de l'activité de conception et d'autre part, à prendre en compte ses caractéristiques dans la spécification de nouveaux outils de pilotage. Le pilotage des compétences d'un acteur (de l'entreprise tout entière à l'individu) se déploie sur les trois niveaux de décision traditionnels en répondant aux questions suivantes (Tableau 6) :

- Quelles sont les compétences stratégiques qu'il faut développer (missions, projets à lancer) ?
- Quels sont les plans d'actions appropriés permettant d'acquérir et de développer ces compétences ; comment constituer des équipes performantes ?
- Quelles sont les activités opérationnelles à réaliser, quelles sont les activités de développement de compétences et quelles sont les conditions de leur réussite ?

Vision "réservoir" (court terme à moyen terme)	Vision "potentiel" (moyen terme à long terme)
Identification des projets à lancer dans un portefeuille	Définir une orientation stratégique et une politique de développement des compétences
Constitution d'une équipe performante	Définir un plan d'actions de développement des compétences
Gérer des activités opérationnelles	Gérer des activités constructives

Tableau 6 : Le pilotage des compétences - vision "réservoir" ou vision "potentiel"



### 2.3. Recherche sur l'évaluation de performance

L'évaluation de performance est pour sa part un thème transversal car elle porte sur l'ensemble des processus impliqués dans la conception [Micaëlli, 2003 ; Girard et Doumeingts, 2004 ; [DC.2] ]. Elle porte sur le contenu technique de l'activité de conception et relève de décisions du management de projet. L'évaluation de l'activité permet d'identifier et de valider les compétences mises en œuvre. Certains auteurs se sont intéressés à mieux intégrer les compétences dans les systèmes de pilotage des performances d'entreprise [Boucher et Burlat, 2003 ; Bennour, 2004].

### 2.4. Second positionnement de notre projet

La Figure 9 présente une synthèse des différentes problématiques scientifiques en conception en correspondance avec les principales caractéristiques de la conception. Nous avons dressé dans ce chapitre un positionnement global des pistes de recherche en conception.

Dans le chapitre suivant, nous allons préciser notre problématique de recherche et notre positionnement, qui articulent des représentations de l'architecture d'un produit avec la conception de l'organisation d'un projet de conception.

Nous positionnons principalement notre problématique :

- sur la modélisation du produit et le traitement des données (plus particulièrement, sur l'identification de l'architecture d'un système et l'amélioration d'un algorithme de *clustering* ; sur la modélisation d'une famille de produits et la génération de variantes),
- sur la conception de l'organisation d'un système de conception et le pilotage des systèmes de compétences (plus particulièrement, la constitution d'équipes, la structuration des Métiers),
- sur le couplage de ces deux thématiques souvent considérées séparément dans le domaine des Sciences et Techniques de la Production.

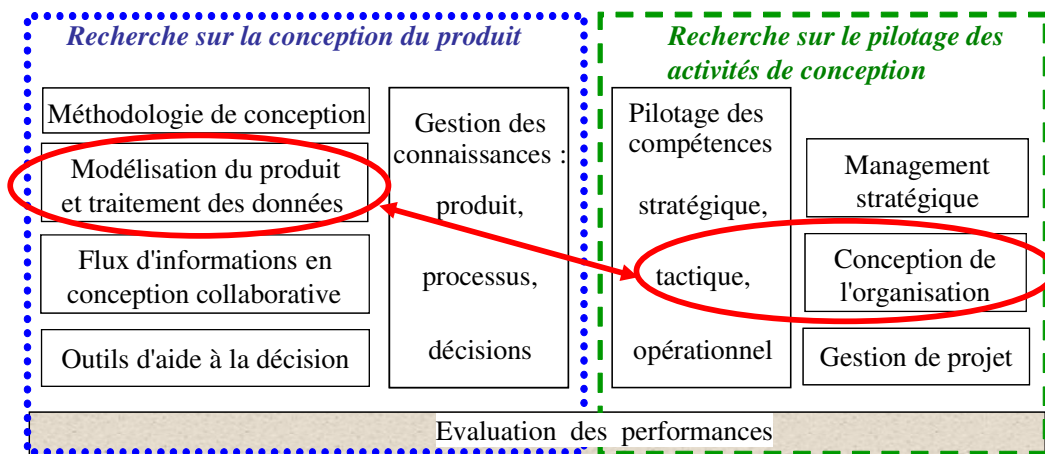


Figure 9 : Positionnement global de notre recherche

## Chapitre 3. Un projet d'instrumentation du métier d'architecte système

La finalité de nos travaux est de développer des modèles, méthodes et outils d'aide à la décision permettant de supporter les activités à la fois technique et organisationnelle d'un architecte système. Nous allons détailler la problématique et montrer maintenant qu'il existe des manques en termes d'instrumentation des activités de l'architecte système. Le chapitre précédent a positionné globalement cette problématique. Le présent chapitre va la détailler.

### 3.1. Une activité métier : identifier l'architecture du système

Deux tactiques de conception complémentaires peuvent être utilisées pour identifier l'architecture d'un système mécatronique, selon le type de problème rencontré :

- Pour surmonter la complexité et faciliter l'évolution future du produit, l'architecte système peut concevoir le produit de façon modulaire.
- Pour gérer la diversité souhaitée par les clients, l'architecte système peut concevoir une famille de produits.

La première tactique peut s'appliquer dans le cas de la conception d'un système mécatronique ne faisant pas partie d'une famille. En conception modulaire, un sous-système est un groupement de constituants, appelé "module", qui est conçu pour posséder les caractéristiques particulières suivantes : réaliser une (ou plusieurs) fonction(s) du système ; assurer de nombreuses interactions entre ses constituants, c'est-à-dire, une forte cohésion interne ; être faiblement couplé aux autres modules. Cette dernière caractéristique est utile pour faciliter l'intégration d'un module dans le produit, pour faciliter son évolution ou remplacement par un autre module, et pour permettre sa conception de façon relativement autonome et simultanée à celle du reste du système. L'objectif de la conception modulaire est de spécifier les exigences portées par chaque module ainsi que leurs interfaces physiques.

L'architecte système doit être capable d'identifier une architecture modulaire et de propager les évolutions de modules faisant suite à des changements technologiques (apparition d'une nouvelle génération de produits). Une étude bibliographique (Tableau 7: **comment identifier une architecture modulaire ?**) nous a permis de montrer le manque de travaux de recherche sur l'évolution de l'architecture modulaire et sur l'identification conjointe des architectures fonctionnelle et organique d'un système.

La deuxième tactique de conception se décline elle-même en deux types de familles de produits, appelés "famille paramétrique de produits"<sup>30</sup> ou "famille de produits modulaires"<sup>31</sup>. Dans nos travaux, nous avons essentiellement étudié la modélisation de famille de produits modulaires. Certains auteurs s'intéressent à définir une plateforme de la famille de produits<sup>32</sup>, correspondant à l'ensemble des constituants communs à tous les produits de la famille. Cette approche repose sur une architecture modulaire de la famille de produits. A partir d'une architecture générique, il est possible d'obtenir l'ensemble des variantes de la famille par choix de modules optionnels ou distinctifs. L'objectif est de trouver un bon compromis entre variété, synonyme de personnalisation accrue du produit et standardisation, synonyme d'économie d'échelle ("*variety vs. commonality*") [Ulrich, 1995 ; Alizon *et al.*, 2007b]. De nombreux travaux existent dans ce domaine (Tableau 7: **comment modéliser l'architecture d'une famille de produits ?**). Ils visent soit à identifier les constituants devant faire partie de la plateforme, soit à concevoir le système d'assemblage ou la chaîne logistique associés à une famille. Toutefois, des modèles et outils sont encore nécessaires pour gérer la diversité et générer automatiquement les variantes dans une famille de produits.

---

<sup>30</sup> Le terme anglo-saxon est "scale-based product family" [Messac *et al.* 2002]. Ce type de famille se rencontre souvent en ameublement où par exemple, les dimensions du meuble peuvent être choisies et paramétrées à la commande du client. Les connaissances liant les spécifications du produit, à son architecture organique et à sa fabrication sont alors disponibles et permettent de générer (semi-)automatiquement la gamme et les programmes de fabrication.

<sup>31</sup> Le terme anglo-saxon usuel est "module-based product family".

<sup>32</sup> Une famille de produits peut exister sans que soit définie une plateforme. C'est souvent le cas des travaux portant sur la configuration de produits où il s'agit de générer les variantes possibles d'une famille à partir d'un ensemble de modules et de règles de combinaison.

### 3.2. Une activité organisationnelle : concevoir l'organisation du système de conception

Quelques chercheurs ont travaillé sur la décomposition du projet de conception en différentes équipes, responsables d'une partie des tâches de conception, avec une coordination adéquate pour intégrer toutes leurs contributions (Tableau 7 : **comment constituer des équipes compétentes ?**).

En Sciences et Techniques de la Production, le thème de la conception de l'organisation d'un projet est essentiellement étudié sous deux angles complémentaires : la structuration des processus (*Business Process Re-engineering*) et la constitution d'équipe (*team building*).

La modélisation des processus étant largement étudiée par la communauté de la modélisation d'entreprise, nous focalisons notre état de l'art sur les travaux permettant de structurer les processus et de limiter les itérations en conception (Tableau 7 : "Optimisation des processus et réorganisation des équipes de conception"). Les approches de constitution d'équipes qui existent (Tableau 7 : "Constitution d'une équipe") ne présentent pas de couplage avec l'identification de l'architecture du produit.

Par ailleurs, les évolutions rapides des situations de conception (des technologies, des méthodes, des outils, des organisations, des réglementations ...) nécessitent de mieux piloter les compétences disponibles dans les Métiers de la conception, ou plus globalement, dans la chaîne de valeur étendue dans laquelle l'entreprise est amené à co-développer ses produits. Les travaux existants se situent (souvent exclusivement) soit au niveau stratégique, soit au niveau organisationnel, soit au niveau opérationnel. Les directeurs des Métiers de la conception et les architectes ont besoin de modèles et de méthodes permettant de mieux déployer les compétences stratégiques sur l'organisation de la conception constituée de compétences collectives, puis sur les compétences individuelles des concepteurs (Tableau 7 : **comment piloter les systèmes de compétences ?**).

Des travaux au MIT (Massachusetts Institute of Technology) ont proposé d'utiliser les matrices structurelles de la conception (*Design Structure Matrix : DSM*) pour modéliser différents domaines d'un projet de conception : le produit, le processus ou les acteurs. Des algorithmes ont été développés pour identifier l'architecture de chaque domaine séparément. Dès 1977, Galbraith [1977] a souligné la forte interdépendance entre l'architecture du produit et l'organisation du projet de conception. Récemment, Sosa *et al.* [2003, 2007b] ont analysé cette interdépendance en se focalisant sur les effets de l'architecture du produit sur les communications techniques entre les concepteurs. Des recommandations ont été formulées pour adapter conjointement les architectures des différents domaines du projet. Cependant, peu de travaux ont étudié ou formalisé cette relation (Tableau 7 : **comment co-architecturer le produit et le projet de conception ?**). Il n'existe pas d'outil formel permettant d'optimiser le couplage entre les domaines ou de propager des évolutions d'un domaine vers un autre.

Pour illustrer le besoin industriel, prenons l'exemple d'un projet de conception d'une boîte de vitesse robotisée. La volonté stratégique est de limiter les coûts de production par économie d'échelle. L'architecte est contraint à réutiliser la partie mécanique d'une autre boîte de vitesse (BV) existant depuis plus de 15 ans. La pédale d'embrayage et les câbles de changement de vitesse disparaissent. Un actionneur est introduit pour "robotiser" le changement de rapport. Des lois de commande liées aux exigences fonctionnelles doivent être spécifiées. Une nouvelle fonction apparaît donc au sein de l'équipe de conception : chef de projet de l'actionneur (spécification, validation), en lien fort avec le fournisseur de ce module. L'évolution du produit a nécessité l'évolution de l'équipe de projet. En même temps, le Métier en charge de l'architecture mécanique des BV s'est restructuré autour des modules fonctionnels de la BV (par exemple, module de commutation / actionnement ou module de couplage), afin de spécialiser des "pôles de compétences" sur la spécification, la modélisation, l'intégration et la validation des composants des

modules de la BV. Cette évolution s'est accompagnée de l'évolution des métiers concernés et de la redéfinition du processus de conception de l'architecture mécanique.

### 3.3. *Positionnement international et national de notre recherche*

Les sections 2.1 et 2.2 ont présenté un positionnement de nos travaux par thèmes par rapport à l'état de l'art (Tableau 7). Nous présentons dans ce paragraphe un positionnement à la fois international et national de nos travaux de recherche par laboratoires et communautés.

#### 3.3.1. Laboratoires et communautés au niveau international

Le domaine de la conception en général est bien représenté au niveau international par la "Design Society" (<http://www.designsociety.org>). Dans la liste des groupes de travail de la Design Society (Special Interest Groups, SIGs), deux groupes recoupent nos préoccupations :

- Product Structuring and Modularisation (Chair: Prof. Asko Riitahuhta, Institute of Production Engineering, Tampere University of Technology, Finland) ;
- Modelling and Management of Engineering Processes (Chair: Prof. Dr. -Ing. Sandor Vajna, Chair of Information Technologies in Mechanical Engineering, Otto-von-Guericke University Magdeburg, Germany).

Un troisième groupe peut également nous intéresser de par les travaux génériques sur la conception qui y sont effectués :

- Design Theory and Research Methodology (Chair: Prof. Dr.-Ing. Lucienne Blessing Engineering Design & Methodology, Technical University of Berlin, Germany).

La "Design Society" soutient des conférences internationales de grande renommée comme ICED<sup>33</sup>, Design Conference<sup>34</sup> ou encore "Applied Engineering Design Science Workshop". Elle entretient des partenariats avec des revues ciblées sur la conception comme l' AI EDAM, Design Studies, Journal of Engineering Design et Research in Engineering Design

Plus spécifiquement, le domaine de l'ingénierie système est fortement structuré par l'INCOSE<sup>35</sup>, association fondée en 1990, qui compte aujourd'hui plus de 6000 membres. L'INCOSE publie et diffuse à ses membres une revue qui s'appelle "Journal of Systems Engineering". Cette association soutient aussi des conférences internationales très sélectives comme "INCOSE International Workshop". Elle a publié des ouvrages de référence pour les chercheurs et praticiens de l'ingénierie système comme "Systems Engineering Capability Assessment Model" ou "Systems Engineering Handbook".

Une communauté internationale s'est structurée autour de l'outil DSM<sup>36</sup>. L'utilisation de cet outil s'est fortement répandue grâce aux travaux des chercheurs du MIT au cours des années 90. Il permet de modéliser et d'analyser l'architecture d'un système et de faciliter la gestion du projet de conception. Une conférence annuelle a lieu sur le développement et l'usage de cet outil : International DSM Conference<sup>37</sup>. Cette conférence est soutenue par la Design Society. En raison du recouvrement des thèmes, des membres de l'INCOSE concernés par l'architecture des systèmes complexes participent aussi à cette conférence.

---

<sup>33</sup> International Conference of Engineering Design. Site internet : [www.iced07.org](http://www.iced07.org)

<sup>34</sup> Site internet : [www.designconference.org](http://www.designconference.org)

<sup>35</sup> The International Council on Systems Engineering. Site internet :

<sup>36</sup> Design (or Dependencies) Structure Matrix

<sup>37</sup> Site internet : <http://www.dsm-conference.org/> et <http://www.dsmweb.org/>

Verrou		Publications internationales	Publications nationales
T1 Identification d'une architecture modulaire du produit	Comment modéliser l'architecture d'une famille de produits ?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Conception intégrée famille de produits et système d'assemblage</b> : [Boothroyd <i>et al.</i> 2002 ; Gupta et Krishnan, 1998 ; De Lit 2001]</li> <li>• <b>Conception plateforme et famille de produits</b> : [Simpson 1998, 2001, 2004, 2006 ; Siddique 1998, 1999, 2000, 2001 ; Jiao <i>et al.</i> 1998, 1999, 2000, 2004, 2007 ; Du <i>et al.</i> 2001, 2002 ; Meyer et Lehnerd 1997 ; Zamirowski et Otto 1999 ; Martin et Ishii 2002 ; Messac <i>et al.</i> 2002 ; Huang G. <i>et al.</i> 2005 (chaîne logistique) ; Zha et Sriram 2006]</li> <li>• <b>Conception modulaire</b> : [Suh 1990 ; Ulrich et Tung 1991 ; Ulrich 1995 ; Baldwin et Clark, 1997, 2000 ; Ulrich et Eppinger 2000 ; Meyer et Utterback 1993 ; Newcomb <i>et al.</i> 1998 ; Sanchez 1999 ; Huang C. 2000 ; Sered et Reich 2006, Blackenfelt 2001 ; Sosa <i>et al.</i> 2007a]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Conception intégrée</b> : au LAB, [Dufrène, 1991 ; Stadzisz, 1997 ; De Lit <i>et al.</i> 2003]</li> <li>• <b>Configuration de produits, famille de produits et chaîne logistique</b> : [Hadj-Hamou, 2002, Hadj-Hamou <i>et al.</i> 2002]</li> <li>• <b>Conception plateforme et famille de produits</b> : [Agard, 2002 ; Agard et Tollenaere, 2003 ; José et Tollenaere, 2005 ; Deciu <i>et al.</i> 2003, 2005]</li> </ul>
	Comment identifier une architecture modulaire ?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Identification de l'architecture du produit</b> : [Steward 1981 ; Pimpler et Eppinger, 1994 ; Kusiak et Huang 1996 ; Rosen, 1996 ; Erixon, 1998 ; Dahmus <i>et al.</i>, 2001 ; Stone <i>et al.</i>, 1998, 2000, 2004 ; Sudjianto et Otto, 2001 ; Whitfield <i>et al.</i>, 2002 ; Yu J. <i>et al.</i>, 1999 ; Yu T. <i>et al.</i>, 2003 ; Sharman et Yassine, 2004 ; Yassine et Wissmann, 2007 ; Hölttä <i>et al.</i> 2003, 2005, Hölttä et Salonen, 2003 ; Chen L. <i>et al.</i> 2005 ; Fixson 2005]</li> <li>• <b>Définition des interfaces et des flux dans le produit</b> : [Blackenfelt et Sellgren 2000 ; Van Wie <i>et al.</i>, 2001 ; Chen K. et Liu, 2005]</li> <li>• <b>Propagation d'une évolution</b> : [Clarkson <i>et al.</i> 2004 ; Keller <i>et al.</i> 2005 ; Avak 2006].</li> </ul>	Identification de l'architecture du produit : [Meinadier 2002]
	Comment co-architecturer le produit et le projet de conception ?	• <b>Correspondance entre les architectures du produit et de l'organisation</b> : [Sanchez et Mahomey 1996 ; Gulati et Eppinger 1996 ; Eppinger et Salminen 2001 ; Sako, 2002 ; Sosa <i>et al.</i> 2003 ; 2004 ; 2007b ; Nightingale 2000 ; Browning 1999, 2001 ; Oosterman 2001 ; Danilovic et Browning 2007 ; Lindemann 2007, Sosa 2007b ; Bradley et Yassine 2008]	• <b>Correspondance entre les architectures du produit et de l'organisation</b> : [Trassaert 2002 ; Baron, 2005 ; Gutiérrez Estrada, 2007 (conception produit-conduite de projet) ; Micaëlli et Forest 2003 ; Girard <i>et al.</i> 2004, 2006, IPPOP 2001 (conception du système de conception et évaluation de performance)]
T3 Co-conception des architectures produit-projet	Comment constituer des équipes compétentes pour développer des systèmes mécatroniques ?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Optimisation des processus et réorganisation des équipes de conception</b> : [McCord et Eppinger 1993 ; Eppinger <i>et al.</i> 1994 ; Altus <i>et al.</i> 1996 ; Browning 1998 ; Tang <i>et al.</i> 2000 ; Chen S.J. et Lin 2003 ; Cho et Eppinger 2001 ; Yassine et Braha 2003]</li> <li>• <b>Constitution d'une équipe</b> : [Zakarian et Kusiak 1999 ; Braha 2002 ; Chen S. 2005 ; Tsai <i>et al.</i> 2003 ; Acuna et Juristo 04 ; De Korvin <i>et al.</i> 2002 ; Canos et Liern, 2004 ; Tseng <i>et al.</i> 2004 ; Chen S.J. et Lin 2004 ; Fitzpatrick et Askin 2005 ; Certa <i>et al.</i>, 2006 ; Gronau <i>et al.</i> 2007 ; Eiselt et Marianov, 2008]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Optimisation des processus et réorganisation des équipes de conception</b> : [David <i>et al.</i> 2002 ; Ostrosi <i>et al.</i> 2003]</li> <li>• <b>Constitution d'une équipe</b> : [Stickley et Grabot 1994 ; Hadj-Hamou et Caillaud 2004 ; Rose <i>et al.</i> 2006]</li> </ul>
T2 Conception de l'organisation du système de conception	Comment piloter les systèmes de compétence ?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Planification et compétences</b> : [Cai et Li 2000 ; Nembhard 2001, <i>et al.</i> 2002 ; Mosheiov 2001 ; Arditi et Tokdemir 2001 ; Ernst <i>et al.</i> 2004]</li> <li>• <b>Identification des compétences</b> : [Prahald <i>et al.</i> 1990 ; Spencer 1993 ; Meyer et Utterback 1993 ; Sanchez <i>et al.</i> 1996 ; Lucia <i>et al.</i> 1999 ; Stenlund et Hörte 1999 ; Walsh et Linton 2002 ; Ley et Albert 2003 ; Pépiot 2005 ; Berio et Harzallah 2005 ; Jussupova et Probst 2007].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Planification et compétences</b> : [Grabot et Letouzy 2000 ; Franchini <i>et al.</i> 2001, Jia 1998]</li> <li>• <b>Identification des compétences</b> : [Boucher <i>et al.</i> 1999, 2003, 2006 ; Bennour 2004 ; Houé <i>et al.</i> 2006 (intégration des compétences dans le pilotage de la performance) ; Rault 1993 ; Vidal <i>et al.</i> 2002 ; Hermosillo <i>et al.</i> 2002, 2003, 2005 ; Harzallah 2000 ; <i>et al.</i> 2006 (élaboration de référentiels)]</li> </ul>

Tableau 7 : Positionnement de nos thématiques de recherche

Une autre communauté internationale en conception s'est structurée autour des outils informatiques supportant la conception collaborative, appelés CSCW<sup>38</sup>. Une conférence internationale se déroule chaque année : International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design.

Une conférence européenne de bon niveau scientifique est organisée chaque année par Eurosis<sup>39</sup> autour des problématiques de l'ingénierie intégrée (European Concurrent Engineering Conference, ECEC).

Citons enfin une conférence internationale IEEE "International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management" dont l'un des principaux thèmes est le pilotage des processus de conception.

De nombreux laboratoires dans le monde<sup>40</sup> s'intéressent à la conception modulaire des produits et à l'identification d'une architecture modulaire. L'Annexe 1 présente une liste non exhaustive de laboratoires travaillant sur ce thème.

Peu de laboratoires internationaux s'intéressent au thème du pilotage des compétences dans les entreprises industrielles, tel que nous l'abordons en France. Ce thème est essentiellement traité, soit par des chercheurs en sciences de gestion (par exemple, identification et portefeuille de compétences stratégiques, gestion des ressources humaines), soit par les sciences cognitives (par exemple, identification des mécanismes d'apprentissage).

Nous avons co-édité un numéro spécial en revue présentant un état de l'art international [DC.4] et regroupant des contributions internationales représentatives des travaux actuellement en cours. Nous pouvons citer comme laboratoires traitant ce thème : Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation – Karlsruhe et Universität Postdam (Allemagne), Faculty of Engineering and Design – Istanbul (Turquie), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL, Suisse), MSI Research Institute of Loughborough University (UK).

---

<sup>38</sup> CSCW : Computer Supported Collaborative Work et CSCD : Computer Supported Collaborative Design

<sup>39</sup> Site internet : <http://www.eurosis.org>

<sup>40</sup> Le nom de ces laboratoires porte souvent un des intitulés suivants : mechanical design, product development, engineering design, system engineering.

### 3.3.2. Laboratoires et communautés au niveau national

Au niveau national, deux Groupes de Travail du GDR MACS ont des thématiques qui ont d'étroites proximités avec nos objectifs de recherche :

- le GT IS3C, en ce qui concerne nos travaux sur l'identification d'architecture modulaire et d'une façon générale, sur le pilotage des processus de conception.
- le GT C2EI, en ce qui concerne nos travaux sur la conception de l'organisation du projet.

Le Tableau 8 récapitule les groupes de travail en relation avec nos travaux.

Groupe de Travail	Thèmes nous concernant	Principaux centres de recherche travaillant sur des thématiques proches
GT IS3C du GDR MACS	Conception de famille de produits, architecture modulaire, liens avec la chaîne logistique  Conduite et évaluation des activités de conception	INPG Grenoble (dont deux thèses co-encadrées par M. Tollenaere), Ecole des Mines d'Albi-Carnaux, Ecole Centrale de Paris  IMS / LAPS Bordeaux, CRAN Nancy (en particulier, avec le projet RNTL IPPOP), LAMIH Valenciennes, LSIS Aix-Marseille, UTT Troyes
GT C2EI du GDR MACS	Pilotage des compétences, Conception de l'organisation du projet	SIMMO-St Etienne, Laboratoire Génie de Production-Tarbes, IRCCyn-Nantes, LGECO-INSA de Strasbourg, LIRMM-Montpellier
GTs de l'AFIS	Architecture	CRAN-Nancy LSIS – Aix-Marseille LESIA-INP Toulouse
Réseau AIP-Priméca <sup>41</sup>	Soutien à l'enseignement et à la recherche en conception intégrée en mécanique et productique	Co-organisation du forum AFIS à Nancy Organisation du colloque AIP-Priméca

**Tableau 8 : Positionnement national de notre recherche**

<sup>41</sup> Atelier Inter-établissement de Productique et Pôle de Ressources Informatiques pour la MECAnique



### 3.4. Conclusion sur le positionnement de notre recherche

Le Tableau 7 a présenté, pour chacune de nos thématiques de recherche, les publications majeures existantes au niveau international et au niveau national.

Concernant la thématique T1, de nombreux laboratoires dans le monde s'intéressent à la conception modulaire des produits et à l'identification d'une architecture modulaire. L'Annexe 1 présente une liste non exhaustive de laboratoires travaillant sur ce thème. Le Tableau 7 n'est pas exhaustif et recense uniquement les références clés du domaine. Deux constats peuvent être faits : premièrement, concernant la sous-thématique "propagation d'une évolution", il existe très peu de travaux et deuxièmement, peu de travaux s'intéressent à la fois à l'architecture fonctionnelle et à l'architecture organique.

Concernant la thématique 2, la constitution d'équipes et le pilotage des compétences ont suscité un grand nombre de travaux, en particulier dans les sciences des organisations. Cependant, les modélisations actuelles des compétences pour l'optimisation de la constitution des équipes ne sont pas encore satisfaisantes, le développement des compétences étant rarement traité.

Concernant la thématique 3, la liste des références mentionnées dans le Tableau 7 est exhaustive et montre une augmentation des articles traitant ce sujet en 2007. Les travaux menés jusqu'à présent concernent essentiellement des recommandations pour adapter l'organisation du projet à l'architecture du produit. A notre connaissance, il n'existe pas de méthode formelle permettant d'améliorer ce couplage.

Les sections précédentes ont précisé et positionné nos thématiques de recherche. Ainsi notre recherche s'intitule : **"Contributions à l'instrumentation du métier d'architecte système : de l'architecture modulaire du produit à l'organisation du système de conception"**.

Pour positionner les parties suivantes, nous renvoyons le lecteur, à la Figure 1, p.3 qui présente la structure générale du document ou à la Figure 4, p.19, qui propose une cartographie de nos travaux de recherche.

Les parties IV et V suivent l'ordre des thématiques identifiées et sont structurées avec un chapitre sur les fondements, ou état de l'art, et ensuite, un chapitre sur nos contributions.



## Partie IV. Contributions à l'architecture modulaire du produit

Cette partie se compose des chapitres 4 et 5.

Le Chapitre 4 (p. 66) expose un état de l'art sur l'approche système, l'architecture modulaire et la conception de famille de produits. Il permet de présenter les concepts clés de notre recherche, de positionner nos travaux et de montrer l'intérêt des voies de recherche choisies. L'Annexe 1 complète cet état de l'art en présentant une cartographie des centres de recherche et des chercheurs travaillant sur la problématique d'identification d'une architecture modulaire de produits.

Le Chapitre 5 (p. 83) résume trois contributions sur l'identification de l'architecture modulaire du produit :

- L'amélioration d'un algorithme de *clustering*, qui ne fixe pas a priori le nombre de modules et qui privilégie une densification des modules et l'identification d'éléments intégrateurs (thèse de G. Harmel ; utilisation de techniques d'optimisation ; tests sur des cas d'école ; application sur des architectures de moteur ; non valorisée en revue).
- Une méthode permettant de propager des choix d'architecture fonctionnelle sur l'architecture de composants (thèse de G. Harmel [Th.3] ; utilisation d'une modélisation matricielle, de la logique floue et d'un algorithme de *clustering* ; application sur un projet de conception d'un moteur diesel au sein de PSA / DPMO ; valorisation avec un "short paper" dans INSIGHT, revue de l'INCOSE et deux soumissions en cours)
- Une méthode de modélisation de l'architecture d'une famille de produits et de génération des variantes (thèse de B. Mtopi [Th.1] ; utilisation des grammaires de graphe ; application à la conception d'une famille de cuisine intégrée au sein de l'entreprise Cuisines Legrand, 25 ; valorisation avec un article dans JESA)

Nous avons choisi de présenter les deux premières contributions avec suffisamment de détails pour montrer le cheminement scientifique et la pertinence des résultats.

La troisième contribution a fait l'objet d'un article accepté dans le "Journal Européen des Systèmes Automatisés" (JESA). Nous avons choisi de présenter succinctement ce travail et de joindre l'article en Annexe 9.

## Chapitre 4. Fondements de l'architecture modulaire d'un système

### 4.1. Introduction

Dans cette partie, nous présentons un état de l'art sur l'identification de l'architecture modulaire d'un système. Pour comprendre notre cadre méthodologique, nous revenons sur les principaux concepts de l'approche système. Cette approche nous a été utile dans l'analyse et la modélisation des activités de conception, dans la recherche d'architecture d'un système et dans l'organisation d'un système de conception. Ensuite nous présentons un état de l'art relatif à l'architecture modulaire d'un produit et enfin, à la conception d'une famille de produits.

### 4.2. L'approche système

Dès 1950, L. von Bertalanffy publie "The general system theory", dans lequel il définit les principes de ce qui deviendra la théorie des systèmes [Von Bertalanffy, 1968]. Il préconise d'étudier les interactions dynamiques entre les parties et non pas de se borner à un regard qui tend à isoler (vision réductionniste), à disséquer et à emprisonner les éléments dans une logique de causalité linéaire. Il s'agit d'être particulièrement attentif à la structure des interactions et à leur contrôle.

L'approche système va emprunter les concepts de boucles de rétro-action et de régulation à la cybernétique (développée par Wiener, 1947) qui a pour but principal l'étude des régulations chez les organismes vivants et les systèmes construits par l'homme. Elle a ensuite évolué vers l'étude de la complexité, avec une attention particulière aux systèmes dynamiques.

En France, J.L. Le Moigne<sup>42</sup> [Le Moigne, 1977], J. De Rosnay [De Rosnay, 1975] et E. Morin [1977, 1992] ont contribué à développer une théorie voire "une science des systèmes" [Simon, 1997] qui se veut d'abord interdisciplinaire et qui vise à rendre compte de phénomènes complexes, en perpétuelle évolution, irréductibles à un modèle analytique de type causal et déterministe. Le macroscopie [De Rosnay, 1975] est un des principaux ouvrages français d'initiation à l'approche système. Il présente les concepts de causalité circulaire (et non plus seulement linéaire) et l'importance du rôle de la rétro-action (feed-back).

Le paragraphe suivant précise notre définition d'un système et présente les principes utiles pour la modélisation de son architecture.

#### 4.2.1. Concepts de système, d'entité et d'interaction

Selon J. De Rosnay [De Rosnay, 1975], un système est un "ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but". Selon [Morin, 1977], "on peut concevoir le système comme une unité globale organisée d'interrelations entre éléments, actions ou individus", l'organisation étant alors "l'agencement de relations entre composants ou individus qui produit une unité complexe ou système, dotée de qualités inconnues au niveau des composants ou des

---

<sup>42</sup> Il est intéressant de noter que J.L. Le Moigne appelle son "Triangle d'or", le triptyque fondamental dans lequel il puise son inspiration : E. Morin, H. Simon et J. Piaget. Si la référence à E. Morin et H. Simon semble évidente, la référence à J. Piaget nous rappelle que la compréhension des systèmes n'a de sens que dans un but d'action qui se retrouve dans l'épistémologie cognitive. Représentations cognitives et représentations explicites sont alors intimement couplées.

individus". Inversement, il précise que "les éléments doivent donc être définis à la fois dans et par leurs caractères originaux, dans et avec les interrelations auxquelles ils participent avec la perspective de l'organisation où ils s'agencent, dans et avec la perspective du tout où ils s'intègrent."

Nous utiliserons par la suite le concept d'architecture dans un sens proche de celui que Morin donne au concept d'organisation. Une architecture sera alors une représentation de l'agencement des relations.

Nous proposons de définir le concept de système comme une représentation (cognitive ou explicite) construite par un sujet : un système est une partie de l'univers qu'un sujet (se) représente comme une entité, entretenant avec son environnement des interactions pertinentes, et constituée d'entités internes entretenant des interactions mutuelles et externes cohérentes.

Cette intelligibilité du système est requise lorsque nous avons l'intention de le comprendre ou d'agir sur lui, que ce soit pour le concevoir, le structurer, le piloter, l'améliorer, etc. Le système devient alors une entité "agentive" [Searle, 1998] sur, à partir, ou dans laquelle le sujet doit agir.

Un système artificiel<sup>43</sup> (ou artefact [Simon, 1997 ; Micaelli et Forest, 2003]) est conçu et agencé intentionnellement, pour répondre à des besoins (fonctions de service ou missions du système). L'artefact existe non de lui-même, au contraire d'une chose naturelle [Searle, 1998], mais parce qu'il a été conçu de sorte à assurer sa fonction.

Le système peut être lui-même intégré dans différents sur-systèmes, selon les points de vue considérés. Il peut adapter ses frontières et son organisation afin de prendre en compte l'évolution de son environnement ou pour améliorer son fonctionnement (régulation, apprentissage et pilotage) [Lemoigne, 1990 ; Probst et Ulrich, 1989].

#### **4.2.2. Concept de vues**

L'approche système consiste à considérer un système comme une entité dynamique qui entretient avec son environnement des interactions finalisées (approche téléologique, externe, par la pertinence). La modélisation du système s'effectue ensuite à partir des interactions mutuelles entre ses constituants (approche interne, par la cohérence), qui lui confèrent un comportement global cohérent (intégration, émergence).

##### **4.2.2.a. Vue externe (ou contextuelle)**

En vue externe, le système est représenté comme une boîte noire échangeant des flux avec son environnement, ainsi que par des scénarios d'échange (flux d'intrants et d'extrants) permettant de fournir des prestations de service à des entités de son environnement, avec lesquels il va interagir au cours de son cycle de vie. Le cycle de vie se décompose en différentes phases de vie, et chaque phase, en modes de fonctionnement. Les prestations attendues par les destinataires correspondent aux missions ou fonctions de service du système. Celles-ci sont quantifiées selon les performances attendues et spécifiées par leurs critères d'appréciation. La méthode traditionnellement utilisée pour élaborer la vue externe est l'Analyse Fonctionnelle.

##### **4.2.2.b. Vue fonctionnelle interne**

En vue interne, le système doit satisfaire un ensemble de fonctions techniques dont l'agencement restitue les fonctions de service. On parle ici d'arborescence puis d'architecture fonctionnelle du système, en cohérence avec Pahl et Beitz [1996]. L'arborescence fonctionnelle est obtenue en décomposant itérativement les fonctions de service en sous fonctions jusqu'à l'obtention de fonctions pour lesquelles on peut définir des solutions techniques [Meinadier, 2002].

---

<sup>43</sup> Par la suite, nous limitons notre étude à ce type de système et le qualificatif "artificiel" ne sera plus précisé. Le terme artefact sera aussi utilisé comme synonyme de système artificiel.

L'élaboration de l'architecture fonctionnelle est utile lorsqu'on cherche à optimiser l'organisation des sous-fonctions (par exemple, regroupement ou factorisation de module, dissociation pour faciliter les évolutions, redondance pour assurer la robustesse lors des évolutions ou pour la sûreté de fonctionnement) [Stone *et al.*, 2000]. L'enchaînement des fonctions de l'architecture fonctionnelle permet de réaliser les processus de fonctionnement internes au système, lui conférant ainsi les comportements spécifiés par les fonctions de service et leurs scénarios. Cette architecture fonctionnelle est en théorie indépendante des choix de conception et est donc réutilisable pour des projets semblables. En pratique, la décomposition fonctionnelle ne se fait pas sans préjuger des choix technologiques. La validation de l'architecture technique va nécessiter des itérations, pour modifier et/ou compléter les exigences et l'architecture fonctionnelle [Lartigue, 2003].

#### **4.2.2.c. Vue organique (interne)**

Dans la vue organique, le système est représenté comme un agencement de constituants (ou d'organes ou de modules) réalisant par leurs interactions les fonctions identifiées dans l'architecture fonctionnelle. Cet agencement est appelé l' "architecture organique" ou technique. Le point clé est la définition des interfaces qui relient les constituants.

#### **4.2.2.d. Vue dynamique (interne)**

Pour structurer un système, il est possible de le décomposer en vue externe, en vue fonctionnelle interne et en vue organique, comme nous l'avons présenté précédemment. Ces vues sont des représentations statiques (ou structurelles) du système. Il est possible aussi de recourir à des représentations dynamiques du système (vue dynamique) qui décrivent son évolution temporelle.

Le système peut être considéré comme un ensemble de processus de fonctionnement qui décrivent l'enchaînement des activités des constituants du système afin de restituer les fonctions de service et leurs performances.

Les normes IEEE 1220 [IEEE 1220] intègrent dans la définition de l'architecture fonctionnelle, des aspects dynamiques en tenant compte du séquençement de l'exécution des fonctions, des flux de données et de contrôle qui le conditionnent. Par la suite, nous parlerons d'architecture fonctionnelle pour désigner uniquement l'arrangement des fonctions et leurs interactions (tout en étant conscient que cela peut être considéré comme un abus de langage).

Même si la modélisation dynamique d'un système est primordiale pour certaines activités de conception comme la détermination des lois de commande ou l'analyse des modes de fonctionnement / dysfonctionnement, nous ne présenterons pas les travaux de recherche concernant les langages et outils de modélisation dynamique car ils sont en dehors de notre champ de recherche. Une comparaison de langage et d'outils pourra être trouvée dans [Baron 2005].

#### **4.2.2.e. Complication et complexité**

Nous n'entrerons pas dans un débat philosophique sur le sens de ces termes mais il est intéressant de préciser leur différence.

La complication est une propriété structurelle. Un système compliqué comprend un nombre élevé de composants et de relations (ils ont une cardinalité élevée). D'où l'intérêt, dès qu'un système est identifié comme tel, de le considérer comme "semi-décomposable" [Simon, 1997]. Pour mieux le comprendre ou le maîtriser, une tactique performante consiste alors à le décomposer par strate, à le structurer en modules [Ulrich et Eppinger, 2000], et à garantir l'ajustement des modules d'une même strate en recourant éventuellement à un module particulier, dit intégratif (qui crée la cohésion du système).

La complexité est une propriété à la fois structurelle et dynamique. Pour notre part, un système est complexe s'il doit être appréhendé à l'aide de différentes vues (ou modèles), appariées par des

relations non triviales (aspect structurel), et si cette modélisation ne permet pas de rendre compte de l'ensemble des états possibles du système du fait de sa dynamique (aspect dynamique) [Micaëlli et Forest, 2003].

Reconnaître un système comme complexe conduit à raisonner en termes de vue et de dialogie. Il s'agit d'abord d'identifier et d'apparier plusieurs vues (ou modèles), une seule, isolée, ne pouvant suffire [Suh, 1990 ; Simon, 1997]. Par exemple, pour un artefact, vue fonctionnelle et vue organique ou pour un acteur, vue cognitive et vue collective.

### 4.2.3. Concept d'architecture, de module et d'élément intégrateur

Le terme architecture recouvre différents sens selon les auteurs qui le manipulent. Dans le cadre de nos travaux, deux définitions complémentaires peuvent être pertinentes.

La première considère que l'architecture d'un produit réside essentiellement dans les choix de passage de l'espace fonctionnel à l'espace organique, chacun de ces espaces ayant aussi une architecture propre. La seconde considère que l'architecture est une vue interne à un ensemble d'éléments inter-reliés.

Les travaux de deux auteurs, Ulrich et Eppinger, sont fréquemment cités par les chercheurs travaillant sur l'architecture de produit. Ulrich [Ulrich et Tung, 1991 ; Ulrich, 1995] définit l'architecture du produit comme :

- l'arrangement des fonctions ;
- l'allocation des fonctions aux composants ;
- la spécification des interfaces entre les composants.

En France, le point de vue de l'IS [Meinadier, 2002] sur l'architecture du produit rejoint celui d'Ulrich. On parle alors d'architecture fonctionnelle et d'architecture organique. Au cours des décompositions conduisant à ces architectures, les exigences sont allouées (réparties) sur les éléments de la décomposition et les interfaces sont définies. La Figure 10 présente une allocation des fonctions aux constituants.

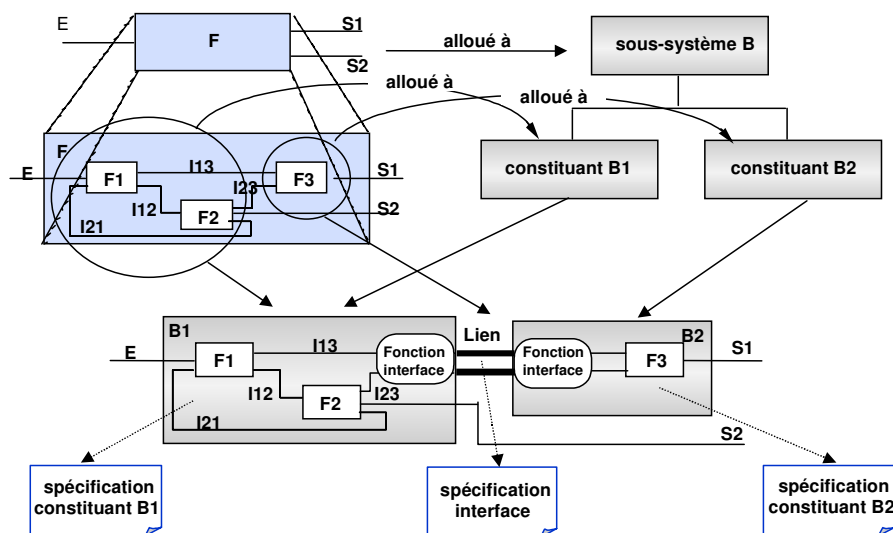


Figure 10 : Allocation des fonctions aux constituants [Meinadier, 2002]

D'autres définitions du concept d'architecture se rejoignent sur le fait que l'architecture d'un système est la description des éléments qui le composent et des interactions qui les lient [Pimmler et Eppinger, 1994 ; Chen K. et Liu, 2005 ; Van Wie *et al.*, 2001 ; Holtta, 2005 ; Crawley *et al.* 2004]. Dans le cadre de la conception concourante, cette définition est enrichie par la prise en compte de l'ensemble du cycle de vie du produit [Dahmus *et al.*, 2001] : "l'architecture du produit

est la structure des composants, leurs interactions et les principes qui gouvernent leur conception et évolution tout au long du cycle de vie."

Le choix de la définition d'une architecture est déterminant dans la façon d'identifier un module.

La typologie d'Ulrich [Ulrich, 1995] met en évidence deux types d'architectures du produit :

- Une architecture modulaire, dans laquelle l'espace des fonctions peut être décomposé en sous-ensembles de telle manière que chaque sous-ensemble impacte distinctement un ou un ensemble de composants. Cela rejoint le concept de conception découplée, défini par Suh [Suh 1990]
- Une architecture intégrale, dans laquelle toutes les fonctions et tous les composants sont fortement liés. Cette définition rejoint le concept de conception couplée, défini par Suh.

Sosa *et al.* [2003] proposent d'introduire un autre type d'architecture, qui est plus proche des cas réels : une architecture hybride composée à la fois de modules (groupements d'éléments) et d'éléments intégrateurs, un élément pouvant être une fonction, un constituant...

Nous appuyant sur les travaux précédents ainsi que sur ceux de Baldwin et Clark [2000], nous définissons ainsi les concepts de module et d'élément intégrateur :

- un module est une entité constituée d'un ensemble d'éléments fortement liés entre eux et faiblement liés à d'autres éléments externes au module et
- un élément intégrateur est un élément qui interagit fortement en nombre ou en intensité avec des éléments appartenant à plusieurs modules. Par conséquent, il est préférable qu'il n'appartienne à aucun module car il crée la cohésion du système dans sa globalité.

L'intérêt de cette définition est sa cohérence avec une représentation matricielle des interactions entre les éléments d'un domaine et l'utilisation d'un algorithme pour identifier une architecture "optimale" de ce domaine.

### 4.3. *Etat de l'art sur la conception modulaire*

Dans cette partie, nous présentons d'abord les avantages et inconvénients de la conception modulaire. Ensuite, nous réalisons une synthèse bibliographique sur l'identification d'une architecture modulaire et sur les méthodes de modularisation d'un produit. Enfin, nous présentons succinctement les outils matriciels de représentation d'une architecture (DSM et matrices d'incidence) ainsi que des algorithmes permettant d'identifier une architecture.

#### 4.3.1. **Avantages et inconvénients de la conception modulaire**

Dans les mémoires de thèse de B. Mtopi et de G. Harmel, nous avons dressé un inventaire des avantages et inconvénients de la conception modulaire [Huang, 2000 ; Baldwin et Clark, 2000 ; Oosterman, 2001 ; Holttä et Salonen, 2003]. Retenons ici les quatre points essentiels :

- Aider à maîtriser la complexité en séparant le système en modules inter-reliés, avec une définition appropriée des interfaces entre modules. Cette approche permet d'envisager des opérations de maintenance ou des évolutions technologiques de modules au cours du cycle de vie du système, sans affecter l'ensemble du système [Newcomb *et al.*, 1998 ; Dahmus *et. al.*, 2001].
- Permettre des économies d'échelle : lorsqu'on augmente les quantités de production, on réduit les coûts par un meilleur amortissement des coûts fixes. Or, la conception modulaire permet la réutilisation de certains modules ou composants (standardisation) et donc l'augmentation des quantités [Sanchez, 1999]. Cela permet aussi de générer de l'économie de variété.



- Réduire les délais de développement ("Time to market") par une optimisation des processus de conception [Browning 1998, 1999]. Si les interfaces entre les composants sont bien définies, il est possible de paralléliser les activités de conception, et donc de réduire les délais de développement.
- Faciliter la mise en place d'équipes de conception, adaptée à l'architecture du produit. Les échanges entre équipes et leur coordination sont prévus dans le cadre du management. Ils sont réduits par une définition appropriée des interfaces [Sosa *et al.*, 2003 ; Baldwin et Clark, 1997 ; Ulrich et Eppinger, 2000 ; Blackenfelt, 2001]. Se spécialisant sur la conception d'un module, l'équipe développe une compétence collective qui peut devenir stratégique si elle est source d'innovation et d'avantage compétitif [Sanchez *et al.*, 1996]. Elle favorise aussi l'externalisation du développement de modules.

Mais la conception modulaire a aussi quelques inconvénients [Oosterman, 2001 ; Whitney, 2003]:

- Une utilisation intensive de la modularisation rend les produits tous semblables.
- La modularisation fait augmenter les risques de voir les produits copiés par les entreprises concurrentes.
- La conception initiale des modules est très difficile en raison de la complexité des contraintes sur les interfaces.
- Plusieurs auteurs affirment qu'une architecture modulaire est un frein pour la conception de produits performants à cause du compromis que réalise une architecture modulaire parmi tous les produits.
- La conception modulaire peut engendrer des surcoûts, si par soucis de conserver les mêmes interfaces, on remplace un composant par un autre plus cher.

Cette synthèse montre que les entreprises s'engageant dans une stratégie de conception modulaire de ses produits peuvent en tirer des bénéfices importants mais doivent être conscientes des limites et des risques de la modularisation.

#### **4.3.2. Identification d'une architecture modulaire**

Dans ce qui suit, nous donnons un aperçu sur le nombre et l'importance des travaux par sous thèmes de recherche :

- L'élaboration de l'architecture du produit, relative à l'agencement hiérarchisé ou non d'éléments : [Dahmus *et al.*, 2001 ; Whitfield *et al.*, 2002 ; Yu T. *et al.*, 2003 ; Sharman et Yassine, 2004 ; Hölttä, 2005 ; Jiao *et al.*, 2007 ; Ulrich et Eppinger, 2000 ; Larses et Blackenfelt, 2003 ; Ulrich, 1995 ; Erixon, 1996 ; Holttä et Salonen, 2003 ; Pimmler et Eppinger, 1994 ; Huang, 2000 ; Stone et al, 2000]. Ces travaux nombreux traitent de la modélisation et l'identification de l'architecture du produit. Quelques uns [Oosterman, 2001] s'ouvrent à la modélisation du projet de conception pour lier l'architecture du produit aux autres caractéristiques du projet.
- La définition des interfaces et des flux d'échanges dans le produit [Blackenfelt et Sellgren, 2000 ; Van Wie *et al.*, 2001 ; Chen K. et Liu, 2005]. Ces travaux s'intéressent aux outils et méthodes de la conception détaillée du produit ainsi qu'aux échanges entre composants, permettant ainsi de faire le lien avec la vue dynamique du produit.
- La propagation d'une évolution dans une architecture. Très peu de travaux se sont intéressés à la propagation de modifications à travers une architecture ou aux conséquences d'une évolution technologique sur l'architecture globale du produit, se traduisant par exemple, par le changement d'un module. Ce thème est central dans les travaux de l'équipe du Prf. Clarkson à Cambridge (UK) [Clarkson *et al.*, 2004 ; Keller *et al.*, 2005].

L'abondance de travaux traitant de l'architecture du produit dénote de l'importance que tient cette problématique dans le domaine de l'ingénierie de la conception. Cependant, on peut nettement faire apparaître qu'il y a un déséquilibre dans le traitement des sous thèmes et que la modélisation de l'évolution des architectures est peu traitée.

Dans ce mémoire, nous nous intéressons à la fois à l'identification des architectures du produit et à la modélisation de leurs évolutions. Cependant, en considérant la modélisation de l'architecture du produit sous la forme d'architectures fonctionnelle et organique, nous nous démarquons ainsi des travaux existants qui sont axés soit sur l'architecture fonctionnelle [Stone *et al.*, 1998, 2000], soit sur l'architecture physique du produit [Pimmler et Eppinger, 1994 ; Whitfield *et al.*, 2002].

### 4.3.3. Méthodes de modularisation du produit

Les outils d'aide à l'identification des modules dans un produit sont peu nombreux dans la littérature de l'ingénierie de la conception. Parmi elles, trois méthodes sont fréquemment référencées :

- Méthode des heuristiques pour identifier l'architecture des fonctions,
- Méthode MFD (Modular Function Deployment),
- Méthode de "clustering" d'une matrice structurelle de conception (en anglais DSM pour Design Structure Matrix).

Une étude comparative de ces trois méthodes a été réalisée par Holttä et Salonen [2003]. Ces méthodes sont susceptibles d'avoir comme résultats des architectures modulaires non optimales et non uniques.

La méthode des heuristiques pour identifier l'architecture des fonctions a été développée initialement par Stone *et al.* [1998, 2000]. Elle est basée sur trois heuristiques séparées qui permettent d'identifier les modules d'un produit. Les principaux critères de modularisation sont fonctionnels et indépendants de l'architecture physique du produit. Cette méthode est présentée comme étant idéale pour la conception de famille de produits [Holttä et Salonen, 2003] mais elle présente le défaut d'être dépendante de l'interprétation et de la décision humaine. Elle ne peut pas être automatisée et de ce fait ne peut être pas appliquée sur des produits complexes [Otto et Wood, 2001]. Cette méthode et sa mise en œuvre sont présentées en détail dans les travaux de Dahmus *et al.* [2001], Otto et Wood [2001] et Holttä et Salonen [2003].

La méthode MFD (Modular Function Deployment) est une méthode de modularisation plus orientée management qu'ingénierie. Elle a été développée par Erixon [1998]. Cette méthode est aussi basée sur la décomposition fonctionnelle et elle est dédiée à la modularisation d'un produit unique.

Les deux méthodes de modularisation précédentes montrent certes plusieurs avantages mais aussi certaines limites :

- Elles nécessitent des choix subjectifs des ingénieurs au cours de la modularisation.
- Elles ne peuvent pas être automatisées et sont difficilement exploitables sur des exemples complexes où une assistance par un traitement informatique serait souhaitable.
- Elles sont essentiellement adaptées à l'espace fonctionnel.

Ces limites font que, comme d'autres chercheurs, nous opterons pour une autre méthode de modularisation, qui consiste à modéliser les couplages par des matrices DSM et à identifier des architectures modulaires, par l'utilisation d'un algorithme de *clustering*.

#### 4.3.4. Représentation des architectures par l'outil DSM

L'utilisation des matrices dans le domaine de la modélisation des systèmes remonte aux travaux de Warfield dans les années 70 [Warfield, 1973] et de Steward dans les années 80 [Steward, 1981]. Cependant, ce n'est que dans les années 90 que cette méthode a reçu une attention de plus en plus grande et une diffusion importante et ce, sous l'impulsion principale des chercheurs du MIT qui ont utilisé cette méthode dans le domaine de la modélisation des architectures en conception.

##### 4.3.4.a. Principes de l'outil DSM

Les matrices binaires de Warfield et Steward sont des matrices d'adjacence (existence ou non d'un arc entre deux sommets dans un graphe) dans lesquelles les éléments en diagonale n'ont aucune signification (les boucles réflexives sont interdites). Ils sont soit laissés vides, soit noircis (éventuellement, on rappelle le nom de l'élément sur la diagonale pour faciliter la lecture d'une matrice de grande taille). Un état de l'art des travaux sur les DSM est fourni dans [Browning 2001]. La Figure 11 présente deux représentations équivalentes d'un système, par un graphe et par une DSM. La Figure 12 montre l'architecture d'un système représenté par une DSM.

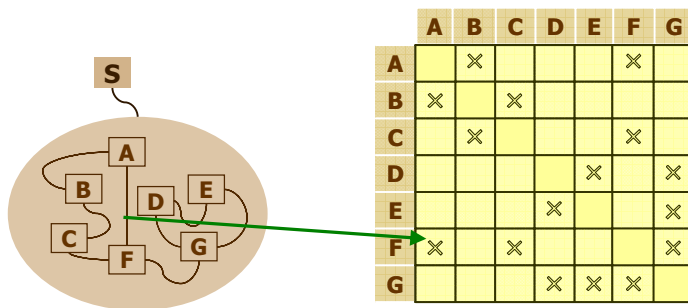


Figure 11 : Exemple de graphe non orienté et représentation sous forme de DSM

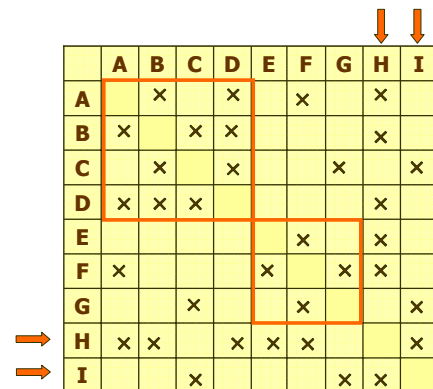


Figure 12 : Exemple de représentation d'une architecture

Il existe deux classes de matrice DSM : les DSM statiques qui correspondent à des matrices symétriques et les DSM temporelles qui correspondent à des matrices asymétriques (Tableau 9).

##### 4.3.4.b. DSM temporelles

Les DSM temporelles permettent de représenter les systèmes dont les éléments sont liés par des relations de causalité ou de précédence. On distingue les DSM Processus et les DSM Paramètres.

Les DSM Processus permettent de modéliser l'enchaînement des tâches des processus de l'entreprise. Les deux grands domaines d'application des DSM temporelles sont :

- L'optimisation des processus du point de vue coût et délais : nous citerons des travaux sur les probabilités de reconception [Yassine *et al.*, 2001] ou sur l'estimation et la réduction des délais de conception [Kusiak et Wang, 1993 ; Browning, 1998].
- L'optimisation des processus pour la conception des équipes de conception : nous citerons les travaux d'Eppinger *et al.* [1994], de Chen S.J. et Lin [2003], et de Braha [2002].

Les DSM Paramètres ont été initialement utilisées pour modéliser les relations de précédence et les contraintes entre les paramètres et variables en conception. Elles permettent d'optimiser les boucles de conception entre groupes de paramètres [Browning, 2001].

L'objectif général lorsqu'on analyse des DSM temporelles est de réorganiser les éléments en ligne et en colonne de manière à réduire les retours en arrière [Kusiak et Wang, 1993]. Il s'agit

alors d'obtenir une matrice diagonale par bloc ou triangulaire, limitant les retour-arrières trop grands ou trop nombreux. Cette réorganisation est assurée par des algorithmes de séquençement.

Type de DSM	Représentation	Application	Algorithme
Produit	Interactions entre composants	Identification de l'architecture des systèmes	clustering
Acteurs (ou Organisation)	Caractérisation des flux et interfaces entre acteurs ou équipes	Conception d'organisation, gestion des flux d'information entre acteurs, minimisation des efforts de coordination	clustering
Activités (ou Processus)	Relations Input/Output entre activités	Structuration des processus, planification des projets	séquencement
Paramètres	Précédences et hiérarchies entre paramètres	Enchaînement de paramètres, structuration des processus	séquencement

Tableau 9 : Différents types de DSM et leurs applications

#### 4.3.4.c. DSM statiques

Les DSM statiques tirent leur nom du fait qu'elles sont utilisées pour matérialiser les interactions entre les éléments d'un système, indépendamment du temps. Deux types de DSM statiques existent : les DSM Produit et les DSM Organisation (ou Acteurs).

Une DSM Produit modélise les interactions entre les constituants d'un produit. Pimmler et Eppinger [1994] proposent une taxonomie permettant de différencier les différents types d'interactions. Historiquement, les DSM statiques binaires ont été choisies pour modéliser l'architecture des produits et modéliser les interactions qui lient leurs composants. Ces DSM permettent d'identifier l'existence ou non d'un type d'interaction étudiée. Elles sont encore fréquemment utilisées malgré l'apparition des DSM numériques.

Dans le cadre de l'IS, Meinadier [2002] justifie l'utilisation des matrices DSM auxquelles il donne le nom de matrices de couplage et d'intégration, car elles permettent en effet de représenter et visualiser facilement les interactions (de différentes natures) entre les constituants. Elles sont utiles d'abord lors de la définition de l'architecture organique (regroupement de modules, optimisation des couplages) et ensuite lors de l'intégration pour vérifier que les zones de couplages et les interfaces entre constituants sont bien réalisées et vérifiées.

Une DSM "Organisation"<sup>44</sup> (ou Acteur) permet de modéliser les interactions et efforts de coordination entre les acteurs dans une équipe de conception. Parmi les travaux les plus récents utilisant les DSM Organisation binaires, on citera ceux de [Sosa *et al.*, 2004], qui proposent une taxonomie des interactions entre acteurs.

Les DSM statiques permettent d'identifier les architectures sous-adjacentes à un produit ou une organisation après l'utilisation d'un algorithme de *clustering*. Dans le cas d'une DSM Produit, le but est de minimiser les interfaces entre sous-systèmes tout en maximisant les couplages internes au module. Dans le cas d'une DSM Acteur, le but est de minimiser les efforts de coordination et d'intégration dans un projet par un découpage approprié des différentes équipes.

<sup>44</sup> Terme utilisé dans les articles anglo-saxons, il pourrait être ambigu dans notre travail où nous considérons l'organisation comme l'architecture des processus, l'affectation de tâches à un acteur et l'architecture des échanges entre acteurs. Aussi, nous avons choisi de le remplacer par le terme Acteurs.

#### 4.3.4.d. DSM numériques

Les premiers travaux sur la numérisation des DSM statiques ont été réalisés par McCord et Eppinger [1993] et ont porté sur la construction d'une DSM acteurs en partant des tâches que les acteurs réalisent. Ils proposent alors de quantifier les couplages entre les acteurs en utilisant une DSM temporelle numérique qui évalue l'intensité des dépendances entre les tâches. Les travaux les plus récents utilisent souvent la fréquence des interactions comme métrique [Sosa *et al.*, 2004].

Quant aux DSM produit, certains travaux pionniers dans la numérisation [Pimmler et Eppinger, 1994] proposent une métrique discrète qui s'applique à tous les types d'interactions identifiées. Une autre métrique très répandue dans les DSM produit numériques, est celle qui utilise des valeurs numériques réelles positives (bornées ou pas) [Clarkson *et al.*, 2004].

#### 4.3.5. Représentation des couplages entre domaines par une Matrice d'Incidence

Les matrices inter-domaines permettent de représenter les couplages existant entre deux domaines. Nous les appelons dans ce mémoire Matrice d'Incidence (MI). La Figure 13 présente un exemple de MI représentant les couplages entre les éléments de deux domaines A et B. D'autres auteurs parlent de matrices d'allocation et de traçabilité [IEEE 1220, 2005] ou de projection [Meinadier, 2002] ou de "Domain Mapping Matrix (DMM)" [Lindemann, 2007 ; Danilovic et Browning, 2007] ou encore de "affiliation matrix" [Sosa 2007b].

Avec les MI et les DSM, on modélise un système complexe composé de plusieurs sous-domaines (Figure 14). Elles sont ainsi complémentaires puisque l'outil DSM représente les couplages internes à tout sous-domaine et les MI, les couplages externes entre éléments appartenant à des sous-domaines différents. Il est alors possible de construire une chaîne de matrices DSM-MI [Eichinger *et al.*, 2006] pour relier de multiples domaines (Figure 15)<sup>45</sup>.

	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>	A <sub>8</sub>	A <sub>9</sub>
B <sub>1</sub>	×		×		×		×	×	
B <sub>2</sub>	×	×							×
B <sub>3</sub>	×			×		×			×
B <sub>4</sub>				×				×	
B <sub>5</sub>		×	×		×		×		
B <sub>6</sub>				×				×	
B <sub>7</sub>	×		×				×		×

Figure 13 : Exemple de matrice d'incidence

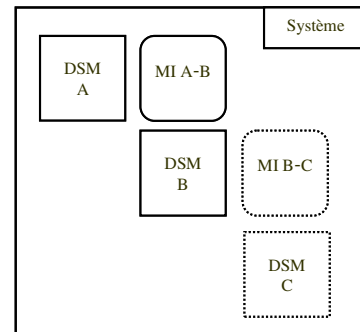


Figure 14 : Modélisation multi-domaines

Les matrices de la conception axiomatique [Suh, 1990] sont un exemple de matrices inter-domaines. Elles permettent de visualiser les relations entre des exigences fonctionnelles et des paramètres de conception.

Un autre exemple est celui de la méthode QFD (Quality Function Deployment) [Akao, 1990], ces matrices représentent les liens entre différents domaines de conception : des besoins clients jusqu'aux processus de fabrication.

Yannou [2001] présente différentes techniques de "mapping" entre les paramètres de conception et les préférences, par exemple, une projection de l'espace structurel des paramètres de

<sup>45</sup> Cette figure est directement copiée du texte de [Lindemann, 2007].

conception (Design Variable Space) sur l'espace fonctionnel des performances (Performance Variable Space).

Plus récemment, Lindemann [2007] propose d'utiliser ces matrices pour favoriser la conception de type "Design for x" en reliant les fonctions, les composants, les processus de production et les ressources de production. Ce travail s'inscrit dans une problématique émergente concernant le **couplage entre les processus de conception du produit et la conduite de projet** associée, ou la planification des ressources de réalisation/production [Baron, 2005 ; Gutiérrez - Estrada, 2007]. Un projet ANR, ATLAS, du programme Technologies Logicielles a été accepté en 2007 et porte sur cette problématique [Aldanondo *et al.*, 2008].

Des travaux récents s'intéressent à la modélisation multi-domaines et sur la recherche du meilleur "alignement" [Sosa *et al.*, 2004] entre architectures de domaines couplés. Sosa [2007-b], Danilovic et Browning [2007] utilisent les matrices d'incidence pour étudier les couplages entre les différents domaines d'un projet de conception et favoriser l'identification d'interactions anormales ou manquantes entre les acteurs. Ce travail correspond à une deuxième problématique émergente, sur laquelle portent nos recherches, concernant l'**alignement des architectures des domaines du projet**.

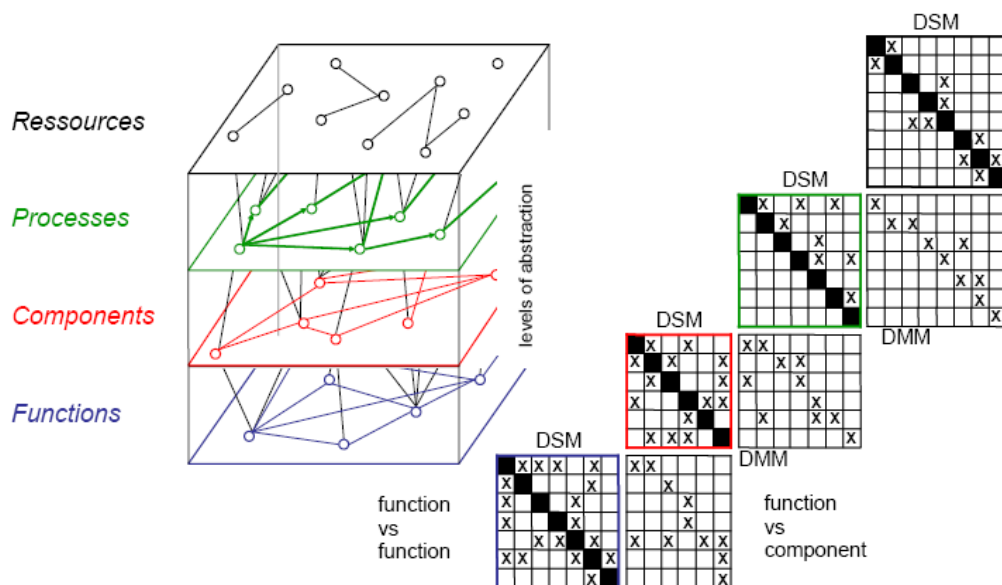


Figure 15 : Représentation par MDM (Multi-Domain Mapping) [Lindemann, 2007]

Deux centres de recherche internationaux portent une attention forte sur ce thème : en Allemagne, dans l'équipe du Prof. Lindemann à Munich (Head of Institute for Product Development, Technische Universität München), et aux USA, avec S. Eppinger (M.I.T), M. Sosa (M.I.T et INSEAD-Singapour) et T. Browning<sup>46</sup> (Fort Worth, Texas).

Mentionnons enfin que ces outils de représentation ont fait l'objet de deux sessions plénières lors de la conférence internationale DSM en octobre 2007, pour conclure sur l'intérêt qu'ils suscitent actuellement.

#### 4.3.6. Métriques de la modularité

Afin de quantifier la modularité, plusieurs métriques ont été développées. Par exemple, Newcomb *et al.*, [1998] a proposé une métrique pour mesurer la modularité d'un produit : le MI (Module Independence). Quelques travaux de recherche se sont intéressés à la comparaison de métriques [Larses et Blackenfelt, 2003 ; Guo et Gershenson, 2004 ; Holta, 2005]. Certaines études

<sup>46</sup> <http://sbufaculty.tcu.edu/tbrowning/>

ont conclu à l'absence de pertinence de la comparaison des modularités entre des produits différents [Gershenson *et al.*, 2004]. Les mesures développées servent alors à comparer différentes architectures d'un même produit.

Guo et Gershenson [2004] ont étudié huit métriques de modularisation et proposent une mesure de la modularité basée sur les intensités des interactions entre éléments dans un système. Whitfield *et al.* [2002] utilisent une métrique proche de celle de Guo avec des pondérations plus pertinentes (le nombre d'interactions disponibles). Cette mesure de la modularité est l'indicateur MSI pour Module Strength Indicator (notation dans le Tableau 10 et exemple dans la Figure 16).

$DSM(i, j)$	Valeur de l'interaction entre l'élément $i$ et $j$ dans la DSM
$n_1$	Index du premier élément du module
$n_2$	Index du dernier élément du module
$N$	Le nombre total d'élément

Tableau 10 : Notations

Le MSI s'applique à un module et se compose de deux parties.  $MSI = MSI_i - MSI_e$  avec :

$$MSI_i = \frac{\sum_{i=n_1}^{n_2} \sum_{j=n_1}^{n_2} DSM(i, j)}{(n_2 - n_1 + 1)^2 - (n_2 - n_1 + 1)}$$

$$MSI_e = \frac{\sum_{i=1}^{n_1-1} \sum_{j=n_1}^{n_2} DSM(i, j) + DSM(j, i)}{2 \times ((n_1 - 1) \times (n_2 - n_1 + 1))} + \frac{\sum_{i=n_2+1}^N \sum_{j=n_1}^{n_2} DSM(i, j) + DSM(j, i)}{2 \times ((N - n_2) \times (n_2 - n_1 + 1))}$$

Figure 16 illustrates the calculation of the MSI coefficient using a 12x12 DSM matrix. The matrix is divided into three regions: internal interactions (M1), external interactions (MSIe), and the total MSI.

**DSM Matrix (n1=1, n2=4, N=12):**

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
E1	5	10	5	5								
E2	10	5	5									
E3	5	5	5					5				
E4	5			5								
E5				5	5	8						
E6					5	7		5				5
E7					8	7	5		6			
E8								8	9	6		
E9								6	6	5		
E10												
E11											7	
E12												7

**Calculs:**

- $MSI_i(M1) = 60 / (4^2 - 4) = 5$
- $MSI_e = [0] + [30 / (2 \times (12 - 4) \times (4 - 1 + 1))] = 30 / 64 = 0.47$
- $MSI(M1) = 5 - 0.47 = 4.53$

Figure 16 : Exemple de calcul du coefficient MSI

L'indicateur MSI permet alors de mesurer le degré de modularité de chaque module en comparant les interactions à l'intérieur et à l'extérieur du module. Le degré de modularité augmente lorsque le nombre d'interactions internes au module croît et que le nombre d'interactions externes décroît. Cet indicateur permet ainsi à l'architecte système d'évaluer la modularité de chaque module et de simuler plusieurs configurations. Ce dernier indicateur semble le plus complet pour évaluer la modularité d'un module. Cependant, ces indicateurs ne peuvent pas être utilisés pour optimiser d'une manière automatique une architecture car ils tendent tous à créer un module unique représentant le système en entier.

#### 4.3.7. Algorithmes d'identification d'une architecture

Le *clustering* fait référence aux méthodes de regroupement des données selon des critères de similarité. Les algorithmes de *clustering* sont soit de type partitionnement lorsqu'ils permettent d'identifier directement un nombre fixe de clusters (par exemple, l'algorithme K-means), soit de type hiérarchique lorsqu'ils permettent d'identifier progressivement les clusters, leur nombre n'étant pas fixé a priori. Ce dernier type d'algorithme peut procéder par agrégation d'éléments (type bottom-up) ou par division du système (type top-down).

Les premiers travaux sur le *clustering* des DSM se situent en 1995 quand Idicula [Idicula, 1995] a soutenu une thèse, encadré par Eppinger au sein du MIT. Il a développé un algorithme, qui a servi de référence à plusieurs travaux ultérieurs, et qui a été successivement amélioré par Fernandez [1998] et Thebeau [2001]. Son objectif est l'optimisation de coûts de couplage lors de la modularisation. Il est de type hiérarchique, bottom-up.

Des travaux utilisant des algorithmes génétiques (AG) existent pour le traitement des DSM temporelles, dont l'objectif est d'optimiser le séquençement et l'enchaînement des tâches [Altus *et al.*, 1996]. L'utilisation des Algorithmes Génétiques dans les problèmes de *clustering* des DSM est récente. Nous pouvons mentionner les travaux de [Whitfield *et al.*, 2002] et de [Yu T. *et al.*, 2003]. L'AG de Yu T. *et al.* [2003] a été utilisé uniquement sur des DSM binaires avec des contraintes bien spécifiques. Dans des travaux plus récents, Yu T. *et al.* [2007] proposent un raffinement de leur algorithme génétique pour traiter des systèmes possédant des architectures complexes. Ils se basent sur une métrique de la théorie de l'information. Selon les auteurs, l'intérêt de cet algorithme est de pouvoir être paramétré pour reproduire des architectures proches de celles qu'un expert juge satisfaisantes. Les comparaisons présentées entre les résultats de leur algorithme sur différentes DSM avec ceux que fournissent des experts humains semblent montrer la pertinence de cet algorithme. Cependant, le but est toujours le même que les autres cités précédemment : maximiser les interactions internes et minimiser les interactions externes. De plus, l'algorithme se complexifie avec des coefficients de pondération qui semblent délicats à fixer.

Dans notre étude, l'algorithme de Thebaud [2001] présente plusieurs avantages : son application sur une représentation des couplages par DSM, la disponibilité de son code sur le web, et l'utilisation du recuit simulé pour favoriser la convergence vers un optimum global, et ce en un temps de calcul "raisonnable". Les inconvénients de cet algorithme sont les suivants :

- Un nombre important de paramètres de réglage (en tout, 8),
- La non-assurance d'obtenir l'architecture optimale du fait du caractère aléatoire du recuit simulé,
- La non-prise en compte de l'existence d'éléments intégrateurs.

Après une période d'utilisation de cet algorithme et après analyse des indices de modularité proposés dans la littérature, nous avons remarqué que des améliorations de cet algorithme étaient possibles.

#### 4.3.8. Algorithme de regroupement basé sur une matrice d'incidence

D'autres algorithmes de *clustering* existent dans la littérature et portent directement sur des matrices d'incidence. Une caractéristique commune à ces algorithmes est qu'ils réorganisent consécutivement les lignes et les colonnes selon un indice de similarité jusqu'à l'obtention de blocs diagonaux. A l'origine, ces algorithmes ont été développés pour le regroupement de machines en cellules de production (Group Technology) capables de produire un ensemble homogène de pièces. Les exemples d'algorithmes sont : ROC (Rank Order *Clustering*) [King, 1980], ROC2 [King et Nakornchai, 1986], BEA (Bond-Energy Algorithm) développé par [McCormick *et al.*, 2002]. Ces algorithmes utilisent une matrice d'incidence de type machine-composant, où un élément  $a_{i,j}$  dans la matrice A, est égale à "1" si la machine i est utilisée pour transformer le composant j, ou à "0" sinon. Ces algorithmes réarrangent les lignes et les colonnes pour former la matrice finale, où les machines qui transforment le même groupe de composants sont proches les unes des autres. En général, les valeurs non nulles dans A sont rassemblées autour de la diagonale de la matrice. Cet arrangement facilite l'identification des cellules manufacturières. Cependant, une fois la matrice A formée, l'identification des groupes reste visuelle.

Ces algorithmes ne peuvent pas être utilisés pour l'identification de l'architecture interne à un domaine mais peuvent permettre de trouver des proximités entre deux domaines.



#### 4.4. *Etat de l'art sur la conception de famille de produits*

Dans le contexte concurrentiel actuel, les industriels doivent concevoir et réaliser une grande variété de produits pour répondre à des besoins de personnalisation accrue demandés par les clients ainsi qu'aux contraintes spécifiques liées aux cycles de vie des produits.

Ils doivent, pour cela, répondre à la diversité commerciale, attendue par les clients, générer des produits différents en maîtrisant la diversité technique des solutions et concevoir un système industriel suffisamment flexible pour permettre la réalisation d'un ensemble de produits tout en maîtrisant la diversité industrielle. Une question difficile concerne alors la manière de produire et de maîtriser ces diversités dans des délais et des coûts acceptables de conception et de réalisation.

La conception par famille de produits a été reconnue comme un moyen efficace pour réaliser une économie d'échelle, pour accommoder une diversité croissante de produits à travers des marchés "niches" et pour réduire les risques de développement par la réutilisation des éléments provenant des offres et activités antérieures.

##### 4.4.1. **Problématiques et bref état de l'art**

Au cours des quinze dernières années, la conception de famille de produits a suscité un vif intérêt au sein de nombreux laboratoires internationaux et au sein des entreprises. Cependant en France, peu de laboratoires se sont positionnés sur ce thème. L'Annexe 1 dresse un bilan des laboratoires concernés.

Citons parmi les chercheurs leaders, T. Simpson, J. Jiao, Z. Siddique qui ont co-édité un livre en 2005 [Simpson *et al.*, 2005] et co-rédigé en 2007 un article de référence dans "*Journal of Intelligent Manufacturing*" [Jiao *et al.*, 2007]. Ils présentent un état de l'art et des perspectives de recherche dans le domaine.

De nombreux travaux portent sur la conception d'une plateforme supportant une famille de produits [Simpson 1998, 2001, 2004, 2006 ; Messac *et al.*, 2002 ; Siddique 1998, 1999, 2000, 2001 ; Jiao *et al.* 1998, 1999, 2000, 2004 ; Du *et al.* 2001, 2002 ; Meyer et Lehnerd 1997 ; Zamirowski et Otto 1999 ; Martin et Ishii 2002 ; Zha et Sriram 2006]. Messac *et al.* [2002] ont utilisé des techniques de programmation optimale pour sélectionner les paramètres communs d'une plateforme de produits et les paramètres variant dans la famille de produits. Siddique et Rosen [1999] ont proposé une approche de grammaire de graphes pour identifier la ressemblance dans une famille des produits. D'Souza et Simpson [2003] ont utilisé des Algorithmes Génétiques (AG) pour rechercher les modules communs d'une plateforme.

Certains travaux se sont intéressés à la conception intégrée de la famille de produits et de son système d'assemblage [Boothroyd *et al.* 2002 ; Gupta et Krishnan, 1998 ; De Lit 2001] ou encore à la conception de la chaîne logistique [Huang G. *et al.*, 2005].

Au niveau national, les travaux de M. Tollenaere font référence, avec l'encadrement de deux thèses soutenues sur la conception de famille de produits [Agard, 2002 ; José, 2005] et des articles dans des revues nationales et internationales majeures [Agard et Tollenaere, 2003 ; José et Tollenaere, 2005]. Des travaux ont également porté sur ce sujet au sein de l'UTBM [Deciu *et al.* 2003, 2005] et du LAB [Stadzisz, 1997 ; De Lit *et al.*, 2003]. Une problématique visant à coupler la configuration de produits et la conception de la chaîne logistique a été développée sous la direction de M. Aldanondo, au sein du centre Génie Industriel de l'Ecole des Mines d'Albi-Carnaux [Hadj-Hamou, 2002 ; Hadj-Hamou *et al.* 2002 ; Lamothe *et al.* 2006].

En raison de la variété de thématique de recherche, le concept de famille de produits a reçu différentes acceptions. Pour notre part, nous nous intéressons à la conception d'une famille de produits, plus particulièrement à la modélisation de son architecture en vue de la génération de variantes.

Nous définissons une famille de produits comme un ensemble de produits semblables possédant des fonctions et des caractéristiques communes, qui satisfont les exigences particulières des clients (point de vue commercial). Chaque produit individuel dans une famille de produits, c'est-à-dire, un membre de la famille, est appelé variante du produit. Dans certains cas, les variantes du produit partagent des structures et/ou technologies communes qui forment la plate-forme de la famille de produits (point de vue technique). Notons qu'un ensemble de modules peut permettre de créer une famille de produits sans pour autant être basé sur une plateforme (par exemple, le kit "*Lego Mindstorm*" permet de créer une famille de robots, sans plateforme commune).

#### 4.4.2. Architecture et génération d'une famille de produits

L'architecture d'une famille de produits doit définir à la fois ce qui est commun et ce qui est distinctif parmi les membres de la famille, aussi bien que les mécanismes par lesquels les variantes du produit peuvent être obtenues.

La structure générique d'un produit (SGP) représentant une famille de produits fait référence à l'organisation générique de tous les modules qui peuvent se trouver dans la famille [Jiao et Tseng, 1999]. En se rapprochant du concept de nomenclature générique<sup>47</sup>, un module générique est un module abstrait qui représente une famille de modules concrets similaires. Les modules concrets peuvent être séparés en deux catégories :

- les modules communs qui appartiennent à toutes les variantes de la famille de produits
- les modules distinctifs qui rendent les variantes du produit différentes les uns des autres.

Les modules communs ne peuvent pas avoir de décompositions futures. Par contre, les modules distinctifs pourront être primitifs ou composés. La structure hiérarchique est une décomposition des modules composés à des niveaux de détail différents, jusqu'à l'obtention de modules communs ou primitifs.

Une Architecture de Famille de Produits (AFP) est subdivisée en trois grands éléments, à savoir les produits de base, les modules distinctifs et les règles de combinaisons.

- Le produit de base (PB) matérialise les éléments partagés d'une famille de produits. Sur le plan marketing, ces éléments s'instancient aux caractéristiques fonctionnelles communes, tandis que du point de vue technique, ce sont les modules communs matérialisant les structures communes du produit.
- Les modules distinctifs (MDs) sont ceux qui rendent les produits différents les uns des autres. Ils sont à l'origine de la variété pour une famille de produits. Vu du côté technique, ces modules distinctifs peuvent être exprimés en relations structurelles distinctes ayant des performances fonctionnelles différentes. Ce sont des modules composés et modules primitifs. Sur le plan marketing, ils deviendront des caractéristiques fonctionnelles pouvant être sélectionnées par le client.
- Les règles de combinaisons (RCs) définissent les règles et méthodes de dérivation des variantes du produit. Elles correspondent à des conditions et des contraintes de sélection de différentes options ou variantes, ainsi qu'à la génération de variété (choix de modules distinctifs).

---

<sup>47</sup> GBOM : *Generic Bill-off- Material* est la correspondance anglo-saxonne de nomenclature générique

## 4.5. Synthèse

Cet état de l'art nous permet de formuler des postulats importants pour la modélisation des architectures de système :

- Un système complexe peut être considéré comme "semi-décomposable" [Simon, 1997], c'est-à-dire que ses sous-systèmes sont interdépendants ;
- Tout système peut être modélisé selon plusieurs vues qui doivent, lors de sa conception, être couplées. En particulier, l'allocation des exigences fonctionnelles du système sur les sous-systèmes est une phase critique d'architecture du système (couplage des vues fonctionnelle et organique) [Meinadier, 2002].
- Il est important de considérer simultanément les architectures de trois domaines clés de la conception : le domaine du produit, le domaine des processus et le domaine des acteurs (ou structures organisationnelles) [Eppinger et Salminen, 2001 ; Browning, 2001]. Ces domaines sont fortement couplés et un bon "alignement" est considéré comme un facteur favorable à la performance d'un projet.
- Une modification dans une vue du produit ou plus généralement, dans un domaine de la conception, va se propager dans les autres vues ou domaines [Clarkson *et al.*, 2004].
- Une architecture modulaire de produits est intéressante pour faciliter la coordination des activités de conception et pour permettre des économies d'échelle, en particulier, en concevant une famille de produits.

Les risques encourus par des relations complexes ou méconnues entre les domaines sont de mauvaises propagations des modifications, des problèmes lors de l'intégration, des dysfonctionnements du système ou des pertes de performances de l'équipe projet liées à des itérations tardives.

Ces postulats seront approfondis par l'état de l'art sur l'organisation d'un projet dans le Chapitre 6.

Les matrices DSM et MI sont des outils de représentation des architectures à la fois simples, visuelles et compactes. Leur construction est recommandée par les normes ou par les experts en IS [Meinadier, 2002 ; Browning, 2001] pour optimiser les architectures, assurer la traçabilité des allocations d'exigences et faciliter l'intégration. Elles sont semblables à des matrices souvent connues par les concepteurs, utilisées dans les méthodes du QFD ou de conception axiomatique. Elles permettent de représenter aussi bien le domaine du produit que l'organisation du projet.

La Figure 17 présente les couplages qui existent, dans le produit entre fonctions et composants et dans l'organisation du projet entre processus et acteurs, ces deux espaces étant également couplés.

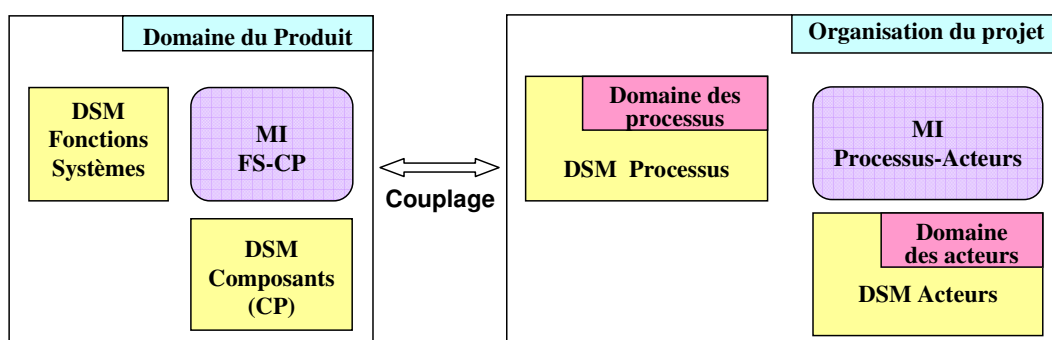


Figure 17 : Couplage entre l'architecture du produit et l'organisation du projet

Pour terminer ce chapitre, nous présentons une correspondance entre ce qu'Eppinger et Salminen [2001] ont appelé les domaines du projet de conception, les types de DSM utilisés et les différents sous-systèmes du système de conception que nous avons identifiés (Figure 18). Nous considérons que le système-projet peut être représenté par une vue opérationnelle, prescriptive (architecture fonctionnelle décrivant les processus) et par une vue collaborative (architecture organique décrivant les acteurs et leurs échanges d'informations). Nous avons décidé de séparer le système de compétences du système-projet car il est à la fois une ressource (mobilisation des compétences par le projet) et un résultat (évolution des compétences de par les activités du projet) du système-projet.

domaines du projet	types de DSM	sous-systèmes du système de conception
domaine du produit	DSM composants DSM paramètres	<div>système-produit</div> <div> vue exigences  vue fonctionnelle  vue organique  vue paramétrique  vue dynamique ... </div>
domaine des processus	DSM processus	<div>système-projet</div> <div>processus (vue opérationnelle, prescriptive)</div>
domaine des acteurs	DSM acteurs	<div>acteurs (vue informationnelle)</div> <div>système de compétences</div> <div>acteurs (vue performance et vue cognitive)</div>

**Figure 18 : Correspondance entre les domaines du projet et les différents sous-systèmes de la conception**

## Chapitre 5. Contributions à l'architecture modulaire du produit

### 5.1. Introduction

L'état de l'art précédent et nos analyses d'activités d'architectes ont montré que plusieurs voies de recherche étaient critiques (points 1 et 2) ou encore peu explorées (points 3 et 4) :

- 1) l'identification d'une architecture modulaire du système,
- 2) la génération de variantes à partir de l'architecture modulaire d'une famille de produits,
- 3) la propagation de modifications d'un domaine sur un autre ou de façon assez semblable, la propagation des choix d'architecture d'un domaine sur un autre,
- 4) la recherche d'alignement entre deux ou plusieurs domaines.

Le Chapitre 5 présente trois contributions relatives à la problématique de l'identification de l'architecture modulaire du produit (points 1 et 3) et à la génération de variantes (point 2). Le point 4 fera l'objet de contribution en Partie VI.

Nous ne prétendons pas couvrir ici de façon exhaustive les activités techniques, critiques d'un architecte système. D'autres activités comme la sûreté de fonctionnement, la vérification et validation du système, ou la spécification des exigences et contraintes provenant des différentes parties prenantes peuvent aussi être considérées comme critiques. Ces activités recouvrent d'ailleurs en partie des préoccupations des groupes de travail de l'AFIS.

Les systèmes sur lesquels portent nos travaux sont

- soit des systèmes techniques, essentiellement des produits mécatroniques,
- soit des systèmes sociotechniques, essentiellement les systèmes de conception.

Dans ce chapitre, nous focalisons notre présentation sur le produit mais certaines approches proposées (amélioration d'un algorithme de *clustering*, propagation de choix d'architecture) sont génériques et seront utilisées dans les parties suivantes.

## 5.2. Amélioration d'un algorithme de clustering

Nous proposons d'abord une réflexion sur l'identification d'une architecture, pour spécifier les qualités attendues d'un algorithme de *clustering*. Puis nous rappelons succinctement la structure globale de l'algorithme de Thebaud. Nous présentons ensuite les améliorations apportées, ainsi que les éléments de validation du nouvel algorithme.

### 5.2.1. Réflexions sur l'identification d'une architecture : qualités attendues

Il convient d'abord de définir les qualités attendues d'un bon algorithme de *clustering*. Cette question nous renvoie à une question encore délicate aujourd'hui dans la littérature s'intéressant à la conception modulaire : qu'est-ce qu'une architecture optimale ?

D'une façon générale, l'identification d'une architecture est un problème de décision multicritère. Il s'agit de tenir compte de la complexité de la conception liée à cette architecture. Le principe de système semi-décomposable formulé par Simon et les axiomes de la conception axiomatique vont dans ce sens et tendent à privilégier la création de sous-systèmes qui soient le plus possible découplés. Il s'agit de limiter la diversité technique en standardisant les composants et faire des économies d'échelle en production. Il s'agit de s'assurer que le système sera facilement maintenable. En résumé, toutes les parties prenantes du cycle de vie du système vont spécifier des exigences sur son architecture.

La méthode de modularisation MFD essaie de prendre en compte plusieurs critères pour proposer un module mais cette méthode reste manuelle et subjective. Les algorithmes de *clustering* cherchent généralement à optimiser une "fonction objectif" qui ne prend en compte que les couplages d'un domaine du système (par exemple, fonctionnel ou organique) [Thebaud, 2001 ; Whitfield *et al.*, 2002 ; Yu T. *et al.*, 2003].

Nous reviendrons sur cette question dans les perspectives de ce projet. En ce qui concerne la suite de ce travail, nous définirons une architecture optimale comme étant la solution minimisant la "fonction objectif" d'un algorithme de *clustering*.

Nous proposons de caractériser les qualités attendues d'un algorithme de la façon suivante :

- S1: Converger de façon répétée (reproductibilité) et rapide (temps de calcul) vers la solution optimale, du point de vue de la "fonction objectif" choisie ;
- S2 : Favoriser des modules denses (densité des modules) ;
- S3 : Pénaliser les modules de grande taille (nombre d'éléments dans un module) car ils peuvent être complexes à concevoir et nécessiter de nombreuses interfaces (intégration difficile) ;
- S4 : Etre facile à programmer ou à modifier ;
- S5 : Nécessiter peu de paramètres à fixer ;
- S6 : Etre compréhensible par son utilisateur. Les principes du calcul doivent être faciles à expliquer. Le résultat doit pouvoir s'interpréter facilement.

Les algorithmes proposés par Yu T. *et al.* [2003 ; 2007] ont l'avantage d'une meilleure convergence vers l'optimum que l'algorithme de Thebaud mais un temps de calcul qui peut être plus long (les auteurs ne fournissent pas ces données comparatives). Les programmes sources ne sont pas disponibles et difficilement compréhensibles par un bon ingénieur méca(tro)nicien.

Nous avons choisi de travailler avec l'algorithme développé par Thebaud car il satisfait les spécifications S1, S4 et S6. Nous proposons, par la suite, des modifications pour améliorer cet algorithme sur les autres critères.

### 5.2.2. Structure globale de l'algorithme de Thebaud

Le but de l'algorithme est de minimiser une "fonction objectif" qui est un coût global de couplage. Pour faciliter sa compréhension, nous prenons un exemple simple.

Au départ, l'algorithme considère que tous les éléments de la DSM constituent un module (ou cluster) (Figure 19, DSM à gauche). Puis l'algorithme fait plusieurs itérations selon la même procédure et aboutit à une DSM intermédiaire (Figure 19, DSM à droite).

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
E1			X			X		X
E2					X			
E3	X					X		
E4						X	X	
E5		X					X	
E6	X		X	X				
E7				X	X			
E8	X							

	E3	E1	E5	E2	E6	E4	E7	E8
E3		X			X			
E1	X				X			X
E5				X			X	
E2			X					
E6	X	X				X		
E4					X		X	
E7			X			X		
E8		X						

Figure 19 : Exemple d'utilisation de l'algorithme

Alors, la procédure est de nouveau appliquée :

- 1) Il choisit aléatoirement un élément parmi tous les éléments (par exemple, l'élément E6).
- 2) Il calcule ensuite une **fonction d'enchères** de tous les modules qui existent à cette étape dans le but de choisir celui qui est susceptible d'être le plus intéressant pour diminuer le coût global de couplage (Figure 20, DSM à gauche).
- 3) Quand un module est choisi pour intégrer cet élément, l'algorithme teste le **coût global de couplage** de la nouvelle architecture.
- 4) Ensuite si le coût est plus faible que dans l'itération précédente, alors évidemment l'architecture est validée et l'algorithme retourne en 1), pour itérer. Dans l'exemple, E6 qui a deux interactions avec E1 et E3 entre dans le module (E1, E3).
- 5) Par **recuit simulé**, il est possible d'accepter, soit la deuxième enchère plutôt que la meilleure au pas 2, soit d'accepter une architecture qui n'améliore pas le coût global au pas 4, et ce, en vue de sortir d'un optimal local et d'explorer d'autres possibilités de réarrangement.

	E3	E1	E5	E2	E6	E4	E7	E8
E3		X			X			
E1	X				X			X
E5				X			X	
E2			X					
E6	X	X				X		
E4					X		X	
E7			X			X		
E8		X						

	E3	E1	E6	E5	E2	E4	E7	E8
E3		X	X					
E1	X		X					X
E6	X	X				X		
E5					X		X	
E2				X				
E4			X				X	
E7				X		X		
E8		X						

Figure 20 : DSM au pas 1 et 2 puis DSM au pas 4

Par la suite, nous allons synthétiser les modifications apportées et les résultats obtenus.

### 5.2.3. Modifications apportées

Taille	Fonction qui renvoie la taille d'un module ou de la DSM, i.e. nombre d'éléments dans une sous-matrice de la DSM.
$DSM(i,j)$	Valeur de couplage entre les éléments $E_i$ et $E_j$ . Notons que pour $i=j$ , $DSM(i,i)=0$ .
$pow\_cc$	Paramètre qui contrôle le type de pénalité affectée à la taille du module dans la fonction de couplage ("2" implique une relation quadratique)
$\delta(i, j)$	Prend la valeur 1 quand $DSM(i, j) \neq 0$ et la valeur 0 quand $DSM(i, j) = 0$ .
$n_1$	Index du premier élément du module $M_k$
$n_2$	Index du dernier élément du module $M_k$ ( $n_2 \geq n_1$ ). Si $n_2 = n_1$ , le module ne contient en fait qu'un seul élément.

**Tableau 11 : Notations de l'algorithme de clustering**

La première modification introduite concerne la fonction d'enchère. Celle-ci permet d'évaluer l'intérêt d'intégrer un élément à un module  $M_j$ .

La formulation initiale utilisée par Thebaud permet d'évaluer la cohésion du module en prenant en compte uniquement les interactions internes au module. La fonction d'enchère que nous proposons calcule l'amélioration de la cohésion du module après intégration du nouvel élément. L'intérêt est de mesurer le gain en cohésion plutôt que la cohésion elle-même d'un module. Le module qui gagne l'enchère est celui qui présente le plus fort gain.

La deuxième modification concerne la "fonction objectif" qui est l'élément déterminant de l'algorithme de *clustering*. Notons que sa formulation correspond à une modélisation de ce que l'expert qui utilise l'algorithme peut considérer comme une "architecture optimale".

Parmi les inconvénients de l'algorithme de Thebaud, nous avons noté

- qu'il utilise 8 paramètres qui sont à fixer avant de lancer l'optimisation,
- qu'il n'identifie pas les éléments intégrateurs dans l'architecture, ce qui perturbe la convergence de l'algorithme, ces éléments étant couplés à beaucoup d'autres.

L'algorithme de Thebaud utilise un paramètre de pénalisation de la taille des modules,  $pow\_cc$ . Dans l'algorithme initial, un élément qui est dans un module a des interactions qui sont, soit internes, soit externes à ce module. Le coût des couplages internes aux modules est proportionnel à la taille du module (à la puissance  $pow\_cc$ ) et le coût des couplages externes est proportionnel à la taille de la DSM (à la puissance  $pow\_cc$ ). L'équation dans le Tableau 12 représente le coût de couplage global qui est la "fonction objectif" de l'algorithme de Thebaud.

<p>Soit une interaction entre deux éléments <math>E_i</math> et <math>E_j</math> qui appartiennent au module <math>M_k</math></p> <p><b>Coût Couplage</b> <math>(E_i, E_j) = (DSM(i, j) + DSM(j, i)) \times (taille(M_k)^{pow\_cc})</math></p> <p>Soit une interaction entre deux éléments <math>E_i</math> et <math>E_j</math> qui n'appartiennent pas au même module</p> <p><b>Coût Couplage</b> <math>(E_i, E_j) = (DSM(i, j) + DSM(j, i)) \times (taille(DSM)^{pow\_cc})</math></p> <p><b>Coût Couplage Global</b> <math>= \sum_{i=1}^{taille(DSM)} \sum_{j=1}^{taille(DSM)} \text{Coût Couplage}(E_i, E_j)</math></p>
--

**Tableau 12 : "Fonction objectif" de l'algorithme de Thebaud**

Dans la fonction coût que nous proposons, nous fixons la pénalisation à 2 ( $pow\_cc = 2$ ). De nombreuses expérimentations ont confirmé l'intérêt de cette valeur. Mise à part cette modification, la formulation du coût de couplage interne est inchangée.



Concernant le coût de couplage externe, nous apportons une première modification qui repose sur l'hypothèse suivante : plus les tailles de deux modules sont grandes, plus il est difficile de les coupler. Le coût de couplage externe, modifié, prend ainsi en compte à la fois la taille de la DSM et les tailles des deux modules concernés par cette interaction externe (Equation dans le Tableau 13).

$$\begin{aligned}
 \text{Coût Couplage Interne}(M_k) &= \sum_{i \in M_k} \sum_{j \in M_k, j \neq i} (DSM(i,j) + DSM(j,i)) \times (taille(M_k))^2 \\
 \text{Coût Couplage externe}(M_k) &= \sum_{i \in M_k} \sum_{j \notin M_k, j \in M_m} [(DSM(i,j) + DSM(j,i)) \times (taille(DSM) + taille(M_k) + taille(M_m))^2] \\
 \text{Coût Couplage Global} &= \sum_{M_k}^{\text{Modules}} (\text{Coût Couplage Interne}(M_k) + \text{Coût Couplage Externe}(M_k))
 \end{aligned}$$

Tableau 13 : Modification apportée à la "fonction objectif"

En complément, nous avons proposé un procédé pour éviter la formation de modules de "trop" grande taille. Pour cela, nous avons corrigé les coûts de couplage précédents par deux coefficients correcteurs, que nous appelons  $MSI_i'$  et  $MSI_e'$  (Tableau 14). Le calcul de ces coefficients est inspiré de la métrique de modularité proposée par Whitfield *et al.* [2002].  $MSI_i'$  (resp.  $MSI_e'$ ) représente la densité des interactions à l'intérieur (resp. à l'extérieur) d'un module. Pour les matrices numériques, une valeur non nulle sera considérée comme "1" (ce qui signifie que l'interaction existe). Notons la double logique de la nouvelle "fonction objectif" (Tableau 15):

- plus  $MSI_i'$  augmente, plus le module est dense, plus le coût baisse ;
- plus  $MSI_e'$  augmente, plus il y a d'interactions externes au module, plus le coût augmente.

$$\begin{aligned}
 MSI_i'(M_k) &= \frac{\sum_{i=n_1}^{n_2} \sum_{j=n_1, j \neq i}^{n_2} \delta(i,j)}{(n_2 - n_1 + 1)^2 - (n_2 - n_1 + 1)} \\
 MSI_e'(M_k) &= \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=n_1}^{n_2} 2\delta(i,j)}{2 \times (n_1 \times (n_2 - n_1 + 1))} + \frac{\sum_{i=n_2}^{taille(DSM)} \sum_{j=n_1}^{n_2} 2\delta(i,j)}{2 \times ((taille(DSM) - n_2) \times (n_2 - n_1 + 1))}
 \end{aligned}$$

Tableau 14 : Coefficients correcteurs

$$\begin{aligned}
 \text{Coût Couplage Interne Corrigé}(M_k) &= \text{Coût Couplage Interne}(M_k) / MSI_i(M_k) \\
 \text{Coût Couplage Externe Corrigé}(M_k) &= \text{Coût Couplage Externe}(M_k) \times MSI_e(M_k) \\
 \text{Coût Couplage Global} &= \sum_{M_k}^{\text{Modules}} (\text{Coût Couplage Interne Corrigé}(M_k) + \text{Coût Couplage Externe Corrigé}(M_k))
 \end{aligned}$$

Tableau 15 : Seconde modification apportée à la "fonction objectif"

Enfin, une dernière modification concerne le traitement spécifique que nous réservons aux éléments intégrateurs. Les algorithmes de *clustering* ont pour objectif de créer des modules et donc tentent d'insérer tout élément à l'intérieur d'un module. Les fonctions de coût (celle de Thebaud [2001] ou celle que nous proposons) ne peuvent pas garantir que les éléments intégrateurs seront placés à l'extérieur des autres modules, ce qui au final, n'est pas conforme à la vision de l'architecte et perturbe la convergence de l'algorithme.

C'est pourquoi nous proposons de calculer un indice de couplage pour identifier "automatiquement" les éléments intégrateurs, définis comme ceux qui interagissent fortement en nombre avec les autres éléments (Tableau 16). Nous offrons aussi la possibilité à l'utilisateur de classer manuellement un élément qu'il considère comme étant intégrateur.

$$IC(\text{élément}_j) = \frac{\sum_{i=1, i \neq j}^{\text{taille}(DSM)} \delta(i, j)}{\text{taille}(DSM) - 1}$$

Tableau 16 : Calcul d'un indice de couplage

#### 5.2.4. Tests et intérêts de l'algorithme amélioré

Nous présentons ici une synthèse des avantages obtenus avec le nouvel algorithme.

##### *Réduction du nombre de paramètres*

L'un des inconvénients de l'algorithme initial est le nombre de paramètres à fixer pour obtenir un fonctionnement satisfaisant de l'algorithme. Cela demande souvent de tester différents jeux de paramètres afin de sélectionner celui qui est le plus approprié.

Les modifications que nous avons apportées permettent de réduire le nombre de paramètres de 8 initialement à 5 paramètres.

##### *Méthode de comparaison selon la taille de la DSM*

Afin de tester l'efficacité des deux algorithmes, nous devons retenir un ou des critères de comparaison. Il est d'abord important de noter que les coûts obtenus ne sont pas comparables puisque les "fonctions objectif" des deux algorithmes sont différentes. Le but des adaptations proposées est de simplifier le paramétrage de l'algorithme et d'améliorer la densité des modules.

Il faut donc pouvoir comparer les algorithmes sur des exemples avec une architecture de référence et évaluer leur capacité à converger vers cette architecture. Nous avons donc retenu comme critère, **leur reproductibilité** que nous mesurons par la fréquence d'obtention de la meilleure solution connue. Nous avons réalisé 40 simulations et ainsi généré 40 architectures pour chaque exemple. Notons que dans chaque exemple, l'architecture identifiée comme étant la meilleure est la même pour les deux algorithmes et correspond bien à celle de référence.

Nous avons créé des DSM de taille différente (des "cas d'école"), en leur attribuant des caractéristiques particulières et en construisant manuellement l'architecture qui serait attendue par l'architecte. Cette architecture sert ensuite de référence pour comparer les deux algorithmes. Le Tableau 17 présente une synthèse des résultats de simulation<sup>48</sup> et fait ressortir les points suivants :

- lors des simulations réalisées, les deux algorithmes ne trouvent pas toujours l'architecture optimale. Cependant pour des tailles de DSM supérieures à 10 (ce qui est fréquemment le cas lors de l'utilisation de l'algorithme), notre algorithme propose plus souvent cette architecture que l'algorithme original. L'écart est sensible pour les tailles de 12 et 16.
- la matrice DSM de taille 14 que nous avons générée semble singulière puisque les deux algorithmes ont des difficultés à mettre en évidence l'architecture optimale.

<sup>48</sup> Nous utilisons ce terme dans un sens proche de "calcul", le résultat étant obtenu après lancement d'un programme informatique. L'idée qui nous convient dans "simulation" est que cela fournit une aide à la décision qui peut être prise en compte ou non. Cependant, le sens de ce terme n'est pas le même ici que dans le cas de la simulation de flux d'atelier où il s'agit de construire un modèle dynamique du comportement de l'atelier. La "simulation" sert à anticiper les conséquences de changement et à prédire le comportement futur d'un système.

Taille	Algorithme original	Algorithme amélioré
8	87 %	77 %
10	85 %	90 %
12	67 %	82 %
14	20 %	25 %
16	57 %	75 %

Tableau 17 : Comparaison de la reproductibilité des deux algorithmes

*Test de pertinence*

Nous avons comparé la pertinence des deux algorithmes dans l'identification de l'architecture de référence ou optimale. Nous avons identifié deux facteurs qui peuvent influencer l'obtention de l'architecture optimale. Le premier est la densité de la matrice<sup>49</sup>. Le deuxième est la valeur relative des interactions externes et internes pour un module donné.

Pour réaliser ce test, nous avons créé deux matrices DSM pour lesquelles nous avons mis en évidence une architecture de référence. La première matrice présentait un grand nombre d'interactions faibles externes aux modules et la seconde comportait un faible nombre d'interactions fortes. Nous avons montré que l'algorithme de Thebeau, dont la fonction objectif tend à pénaliser fortement les couplages externes, tend à créer de grands modules puisque cela permet de réduire le coût de couplage externe. En raison des coefficients correcteurs que nous avons introduits, et plus précisément dans ce cas avec MSII', notre algorithme limite la taille des modules en imposant une contrainte de densité.

Enfin, nous avons comparé le comportement des deux algorithmes en présence d'une architecture hybride. L'algorithme original place logiquement les deux éléments intégrateurs à l'intérieur d'un module, alors que notre algorithme permet leur identification.

**5.2.5. Eléments de validation et synthèse**

Le Tableau 18 propose une comparaison qualitative entre différents algorithmes de *clustering* au regard des critères que nous avons définis dans la section 5.2.1. Une comparaison plus poussée serait certainement utile. Notons qu'à notre connaissance, il n'existe pas de travaux fournissant un "benchmark" approfondi entre les algorithmes existants. En effet, les fonctions coût étant différentes, la comparaison directe est difficile.

	Algorithme de Thebaud	Algorithme proposé	Algorithme de Yu <i>et al.</i> [2003]
S1: Reproductibilité / temps de calcul	+ / +	+ + / +	+ + + / -
S2 : Densité des modules	-	+	+
S3 : Taille des modules limitée	+	+ +	+ +
S4 : Programmation simple, rapide	+	+	-
S5 : Paramétrage simple, rapide	+	+ +	-
S6 : Compréhension simple	+	+	-

Tableau 18 : Comparaison qualitative entre des algorithmes de clustering

<sup>49</sup> Définition : la densité d'une matrice (resp. d'un module) est le nombre d'éléments non nuls qu'elle (resp. qu'il) contient.

Par ailleurs, les tests réalisés jusqu'à présent concernent un nombre réduit de cas possibles. Les résultats devront être confirmés par la création d'autres DSM et par l'étude de cas réels. Toutefois, dans le cadre de notre collaboration avec PSA, nous avons eu l'occasion de vérifier son efficacité lors de son application sur différentes DSM construites dans des situations réelles de conception.

Après avoir présenté l'outil DSM supportant la représentation des interactions et l'algorithme de *clustering* permettant l'identification d'une architecture, nous présentons dans la partie suivante, une méthode permettant de propager l'architecture d'un domaine vers un autre domaine.

### 5.3. *Propagation des choix d'architecture d'un domaine sur l'architecture d'un autre domaine*

Cette section présente une méthode permettant de générer une DSM B connaissant une DSM A et une Matrice d'Incidence MI A-B. Cette situation d'identification d'une architecture peut se rencontrer, dans les phases de conception préliminaire [Pahl et Beitz, 1996], soit pour simuler l'impact des choix d'une architecture d'un domaine donné sur un autre auquel il est couplé<sup>50</sup>, soit en reconception, pour analyser la robustesse d'une architecture face aux modifications introduites dans les architectures d'autres domaines.

Dans le domaine du produit, les deux matrices d'incidence les plus utilisées sont les matrices d'allocation "prestations / Fonctions Système" et "Fonctions Système / Composants Produit" (FS/CP). Ulrich [1995] insiste sur l'importance de l'allocation d'un domaine sur un autre (par exemple, du fonctionnel vers l'organique) lors du processus d'identification d'une architecture. Suh [1990] porte une attention particulière sur la "matrice de conception" qui représente, par exemple, les relations entre les exigences fonctionnelles et les paramètres physiques. Ainsi, les MI, ou plutôt l'information qu'elles contiennent, est un élément clé du processus de conception d'un système. Elles sont l'aboutissement d'une activité importante des architectes systèmes. Cependant, peu de travaux ont proposé d'utiliser la richesse de ce type de matrices, pour en déduire de l'information sur les domaines qu'elle couple, en vue de l'identification d'une architecture, de la recherche de cohérence entre domaine ou de propagation de modifications.

Dans le cadre de notre collaboration avec des architectes, nous avons observé que lorsque ces matrices existent déjà, elles contiennent soit des valeurs numériques sur une échelle [0, 10], soit des valeurs qualitatives comme "nul", "faible", "fort". Le choix de l'échelle d'estimation est important. Les résultats obtenus avec des algorithmes de *clustering* sont meilleurs avec des matrices numériques, plutôt qu'avec des matrices binaires [Thebaud, 2001]. Cependant, il n'existe pas de comparaison sur le meilleur choix d'échelles. L'enjeu de cette modélisation est un compromis entre d'un côté, la fiabilité de l'estimation de l'expert et d'un autre côté, la précision de la valeur estimée. Nous avons décidé de travailler sur des matrices numériques sur une échelle [0, 10] et d'utiliser un système flou pour tenir compte du caractère imprécis des estimations et pour représenter les règles de couplage qui reproduisent au mieux le raisonnement d'un expert. Les matrices ont été obtenues par entretiens avec des architectes systèmes ou des chefs de projet de conception de sous-systèmes.

Dans cette section, nous présentons d'abord les qualités attendues de la méthode et son principe générique. Puis nous expliquons son application au cas de la simulation de l'architecture des composants en partant d'une architecture fonctionnelle et d'une matrice d'incidence FS/CP.

#### 5.3.1. **Qualités attendues de la méthode**

Dans le processus de conception (§ 1.3.1.b, p.44), selon le type de la conception (§ 1.4.1.c, p.47), les concepteurs commencent par élaborer ou adapter l'architecture fonctionnelle du système.

---

<sup>50</sup> Les anglo-saxons parlent de "Domain Mapping", c'est-à-dire de correspondance entre deux domaines.

Le caractère abstrait de cette modélisation lui confère une certaine invariance pour une classe de système (par exemple, dans le cas d'innovation modulaire). La seconde étape qui est primordiale consiste à rechercher des alternatives de principes de solutions. L'architecte système doit alors décider de l'allocation des composants aux fonctions. L'identification de l'architecture organique ne sera détaillée que plus tardivement dans la phase de définition des sous-systèmes et de leurs interfaces. Cependant, lors de la seconde étape, une simulation des conséquences de ces choix d'architecture sur l'architecture organique permettrait très tôt d'infirmer certaines alternatives et de confirmer la stabilité de certains modules (robustesse) face à des évolutions ultérieures.

Une autre utilisation possible de cette méthode de propagation est le couplage du domaine du produit avec celui de l'organisation. En effet, le choix d'architecture du système, en phase de définition du système, est très structurant sur l'organisation du projet en phase de définition des sous-systèmes et en phase de conception détaillée (au niveau des composants)<sup>51</sup>. Nous avons déjà mentionné que selon plusieurs auteurs renommés [Galbraith, 1977 ; Henderson et Clark, 1990 ; Gulati et Eppinger, 1996 ; Fine 1998, 2005 ; Sosa *et al.* 2003 ; Danilovic et Browning, 2007), une organisation appropriée du projet doit être "alignée" sur celle du système à concevoir.

Par la suite, les matrices que nous utilisons pour représenter les domaines sont des matrices numériques sur une échelle 0-10.

Les qualités attendues d'une méthode de propagation sont les suivantes :

- Permettre l'identification d'une architecture dans le domaine simulé, qui soit interprétable par un expert ;
- Etre peu sensible aux imprécisions sur les valeurs de couplage en entrée (erreurs d'estimation d'un expert, comprises entre  $\pm 1$ , voire  $\pm 2$ ) ;
- Etre sensible à des changements significatifs des valeurs en entrée (écarts de plus de 3), ce qui correspond à un nouveau choix d'architecture ;
- Se rapprocher du raisonnement qualitatif d'un expert.

En termes de validation de la méthode, nous pouvons considérer trois types de tests :

- sur des exemples simples (ou des cas d'école) comme la propagation d'une architecture modulaire ;
- sur des exemples industriels (validation empirique par l'expert) ;
- sur une analyse de sensibilité des résultats.

### 5.3.2. Règles de simulation d'une DSM B avec une DSM A et une MI A-B

Nous allons adopter une notation générique pour montrer que le raisonnement n'est pas attaché à l'exemple traité : A (composé d'élément  $A_i$ ) et B (composé d'élément  $B_j$ ) et deux matrices données : une matrice d'incidence A-B (représentant les interactions  $A_i-B_j$ ) et une DSM A (représentant les interactions  $A_i-A_j$ ).

Les règles de calcul de la DSM B sont les suivantes :

**Règle 1.** Lorsqu'un couple d'éléments ( $A_i, A_j$ ) est couplé à un couple ( $B_u, B_v$ ) alors soit  $A_i$  est couplé à  $B_u$  et  $A_j$  est couplé à  $B_v$ , soit  $A_i$  est couplé à  $B_v$  et  $A_j$  est couplé à  $B_u$ .

**Règle 2.** Soit  $B_u$  et  $B_v$  deux éléments de B. S'il existe deux éléments  $A_i$  et  $A_j$  qui interagissent dans la DSM A et si en même temps le couple d'éléments ( $A_i, A_j$ ) est couplé au couple ( $B_u, B_v$ ) alors  $B_u$  et  $B_v$  sont couplés.

**Règle 3.** L'intensité du couplage entre  $B_u$  et  $B_v$  dépend de l'intensité du couplage entre  $A_i$  et  $A_j$  et des intensités de couplage entre les couples ( $A_i, A_j$ ) et ( $B_u, B_v$ ).

---

<sup>51</sup> Nous utilisons ici la terminologie de la norme IEEE 1220, 2005.

**Règle 4.** Nous considérons qu'un élément est couplé à lui-même avec une intensité égale à 10.

La première règle (Figure 21) précise que lorsque dans une matrice d'incidence, on considère un couple d'éléments appartenant à un domaine A ( $A_i, A_j$ ) et un autre appartenant à B ( $B_u, B_v$ ) alors il y a deux combinaisons possibles de couplages : soit  $A_i$  avec  $B_v$  et  $A_j$  avec  $B_u$ , soit  $A_i$  avec  $B_u$  et  $A_j$  avec  $B_v$ . Dans la Figure 23, nous avons choisi de représenter  $A_i$  couplé avec  $B_u$  et  $A_j$  couplé avec  $B_v$ .

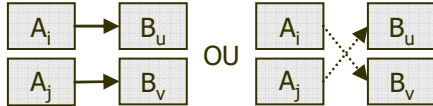


Figure 21 : Couplage entre deux couples de domaines différents

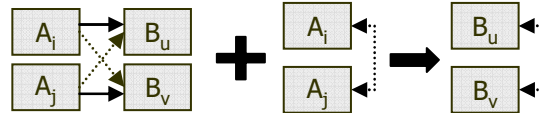


Figure 22 : Propagation de couplages

La Figure 23 montre que l'existence de couplages entre ( $A_i - A_j$ ), ( $A_i - B_u$ ) et ( $A_j - B_v$ ) implique l'existence d'un couplage entre  $B_u$  et  $B_v$ .

La règle 3 complète la règle 2 et affirme que les intensités sont liées entre elles, selon une loi de composition à déterminer.

La règle 4 introduit une extension du concept de DSM en considérant que les éléments sur la diagonale ont une valeur de 10. Cette règle nous permet de conserver une formulation unique dans le cas où deux éléments de B sont couplés au même élément de A ( $A_i = A_j$ ) (Figure 24).

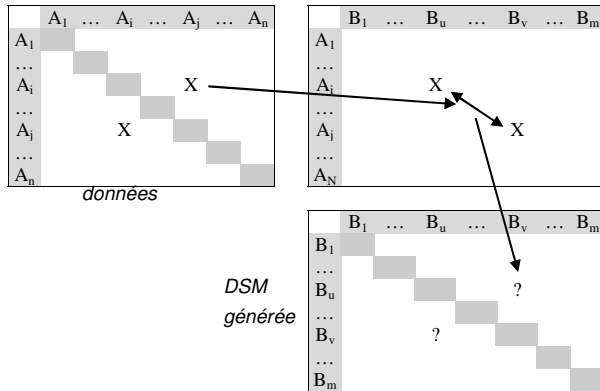


Figure 23 : Propagation de couplages (cas où  $A_i \neq A_j$ )

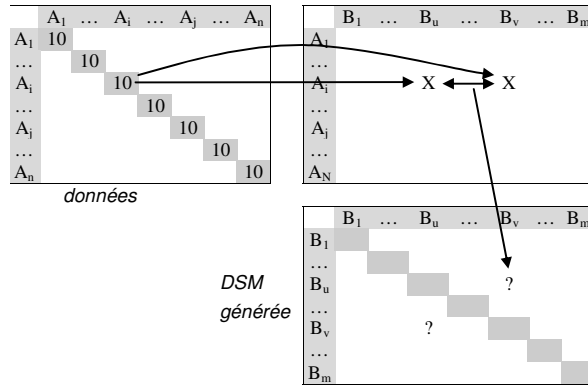


Figure 24 : Cas où  $A_i = A_j$

Expliquons les règles 2 et 3 dans le cas de l'architecture d'un produit. Si  $FS_i$  et  $FS_j$  sont en interaction, elles impactent un ensemble de paramètres partagés ou couplés entre eux. Si  $FS_i$  (resp.  $FS_j$ ) est couplée avec  $CP_u$  (resp.  $CP_v$ ) alors les paramètres qu'ils impactent sont aussi couplés (Figure 25). Ainsi, il est possible d'identifier des contraintes et des interactions entre des paramètres impactés par  $CP_u$  et ceux impactés par  $CP_v$ . Avec la règle 3, nous faisons l'hypothèse que plus les intensités de couplage sont fortes, plus il existe de contraintes entre les paramètres couplés, plus l'intensité de couplage entre  $CP_u$  et  $CP_v$  est forte.

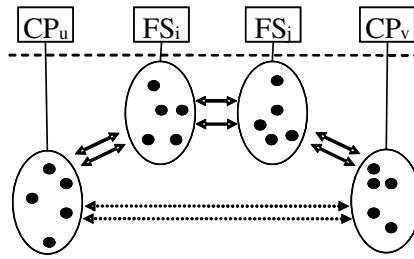


Figure 25 : Explication des règles 2 et 3 dans le cas de l'architecture du produit

### 5.3.3. Structure de la méthode de propagation

Les règles de propagation ont été présentées de façon générique. Dans la suite de ce chapitre, nousinstancions le domaine A par le domaine des FS (Fonctions Système) et le domaine B par le domaine des CP (Composants du système-Produit).

Nous résumons la méthode de propagation en quatre étapes :

- E1 – Construire l'architecture fonctionnelle du produit. Les FS doivent être identifiées par entretiens avec des experts du domaine. Pour estimer l'intensité de couplage entre deux FS, les architectes peuvent considérer l'ensemble des paramètres de conception que les FS impactent ou partagent, de façon semblable aux travaux de [Chen L. *et al.* 2005]. Nous choisissons une échelle d'intensité entre 0 et 10.
- E2 – Construire la matrice d'incidence FS-CP. Les composants doivent être identifiés. L'intensité de couplage entre une FS et un composant est estimée, par l'expert, comme le poids de la contribution de ce composant à la réalisation de la fonction. Nous choisissons une échelle d'intensité entre 0 et 10.
- E3 – Calculer (simuler) une DSM CP à partir de DSM FS et MI FS-CP.
- E4 – Identifier les architectures des deux domaines (modules, éléments intégrateurs) en appliquant l'algorithme de *clustering* sur chaque DSM et interpréter les résultats.

Les intensités de couplage estimées par les architectes étant de nature subjective, nous avons choisi de représenter et de manipuler les quatre règles de propagation présentées en 5.3.2 à l'aide d'un traitement flou. Cela doit nous permettre de lier les interactions intra-domaines (DSM FS) et inter-domaines (MI FS-CP) pour estimer les interactions dans la DSM CP.

Dans ce qui suit, nous présentons le résultat des étapes 1 et 2 (données collectées lors d'un projet de conception d'un nouveau moteur diesel) et nous expliquons ensuite les étapes 3 et 4 en utilisant ces données.

### 5.3.4. Données collectées dans un projet de conception d'un nouveau moteur

Dans le cadre du projet de recherche avec PSA Peugeot Citroën, nous avons eu l'opportunité de réaliser des entretiens avec des architectes fonctions systèmes et des architectes organiques. Nous avons proposé un guide pour la construction des matrices d'incidence et des DSM. Nous avons développé, utilisé, affiné et validé ce guide lors de nos entretiens avec les ingénieurs de PSA. Nous allons utiliser des données collectées dans le cadre d'un projet de conception d'un nouveau moteur pour illustrer la méthode de propagation.

Le Tableau 19 présente la liste des FS et des composants d'un moteur 2L Hdi. Les numéros sont utilisés par la suite pour simplifier les écritures de matrices. Le Tableau 20 correspond du côté gauche, à la matrice DSM FS et du côté droit, à la matrice d'incidence FS-CP.

N°	Abréviation	Nom de la Fonction Système
1	Resp	Respiration
2	Alim carb	Alimentation Carburant
3	Dépol	Dépollution
4	Comb	Combustion
5	CPC	Conversion Pression Couple
6	PLV	Pertes par frottement, Lubrification et Ventilation
7	EFF	reprise d'EFFort
8	CES	Conversion et dérivation des Energies Secondaires
9	ACV	ACoustique Vibratoire
10	IES	Sensorique et contrôle
11	THE	Thermique
12	COU	Couplage
13	Vol Fonc	Volumes fonctionnels



N°	Abréviation	Nom du composant
1	EGR	Exhaust Gas Recycle,
2	GES	Générateur et stockage d'énergie
3		Injection Carburant
4		Culasse Assemblée
5		Admission d'air
6		Echappement
7		Distribution
8		Attelage mobile
9		Carter
10		Lubrification et Blow-by
11		Entraînement accessoires
12		Entraînement synchrone
13		Circuit vide
14		Circuit caloporteur
15	CC	Capteurs et Commande

Tableau 19 : Liste des FS et des composants avec leurs abréviations

FS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	10	9	7	8			6	5	6	8	7		6
2	9	10	9	9			7		7	8	5		7
3	7	9	10	9		8	8		7	7	9		7
4	8	9	9	10	8	4			8	9	8		4
5				8	10	9	9	8	8		7	8	8
6			8	4	9	10	7	8	5	6	8		6
7	6	7	8		9	7	10	8	8		8	9	8
8	5				8	8	8	10	3		5		6
9	6	7	7	8	8	5	8	3	10	5		7	
10	8	8	7	9		6			5	10	5		5
11	7	5	9	8	7	8	8	5		5	10	8	
12					8		9		7		8	10	8
13	6	7	7	4	8	6	8	6		5		8	10

FS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	8		9						6	8	7		6
2		8		8			7		7	8	5		8
3	5	5	6	5		8	7	5	7		8		8
4	9	9	6	9			4	5	6	9	3		7
5	8		9			6	5		6	6	8		6
6	9	9				7		8	8				7
7	5			7	9	7	7		8		8	9	8
8				8	6	8	9		8		8	9	9
9	5				8	9		4	5	3	8		7
10					6		8	9	5		6		8
11					8	9		9	8		6		7
12	8					8		9					8
13						5	8	5	6		9		7
14						4	5	9	5		5		7
15	7	9	7	8		6				9	9	8	4

Tableau 20 : DSM FS et MI FS-CP numériques

### 5.3.5. Calcul d'une DSM CP à partir de DSM FS et MI SF-CP

La Figure 26 présente une décomposition de l'étape E3 précédente. Nous utilisons un traitement flou pour calculer la valeur de chaque couplage possible entre deux éléments du domaine des CP.

Les variables d'entrée ainsi que la variable de sortie utilisent la même caractérisation basée sur quatre variables linguistiques : Nul, Faible, Moyen et Fort. Les fonctions d'appartenance sont choisies de forme trapézoïdale et ont été ajustées pour réduire l'influence des valeurs faibles (comprise entre 0 et 3, voire 4). Les 4 variables d'entrée permettent 81 combinaisons ( $3^4$ ) qui ont été simplifiées en 20 règles d'inférences floues, qui permettent de calculer l'intensité d'interaction entre deux éléments  $CP_u$ - $CP_v$  pour tout couple d'éléments  $FS_i$ - $FS_j$ .



Notons  $\text{DSM}_{(\text{FS}_i, \text{FS}_j)}(\text{CP}_u, \text{CP}_v)$ , la valeur de l'interaction entre  $\text{CP}_u - \text{CP}_v$  correspondant au couplage entre  $\text{FS}_i - \text{FS}_j$

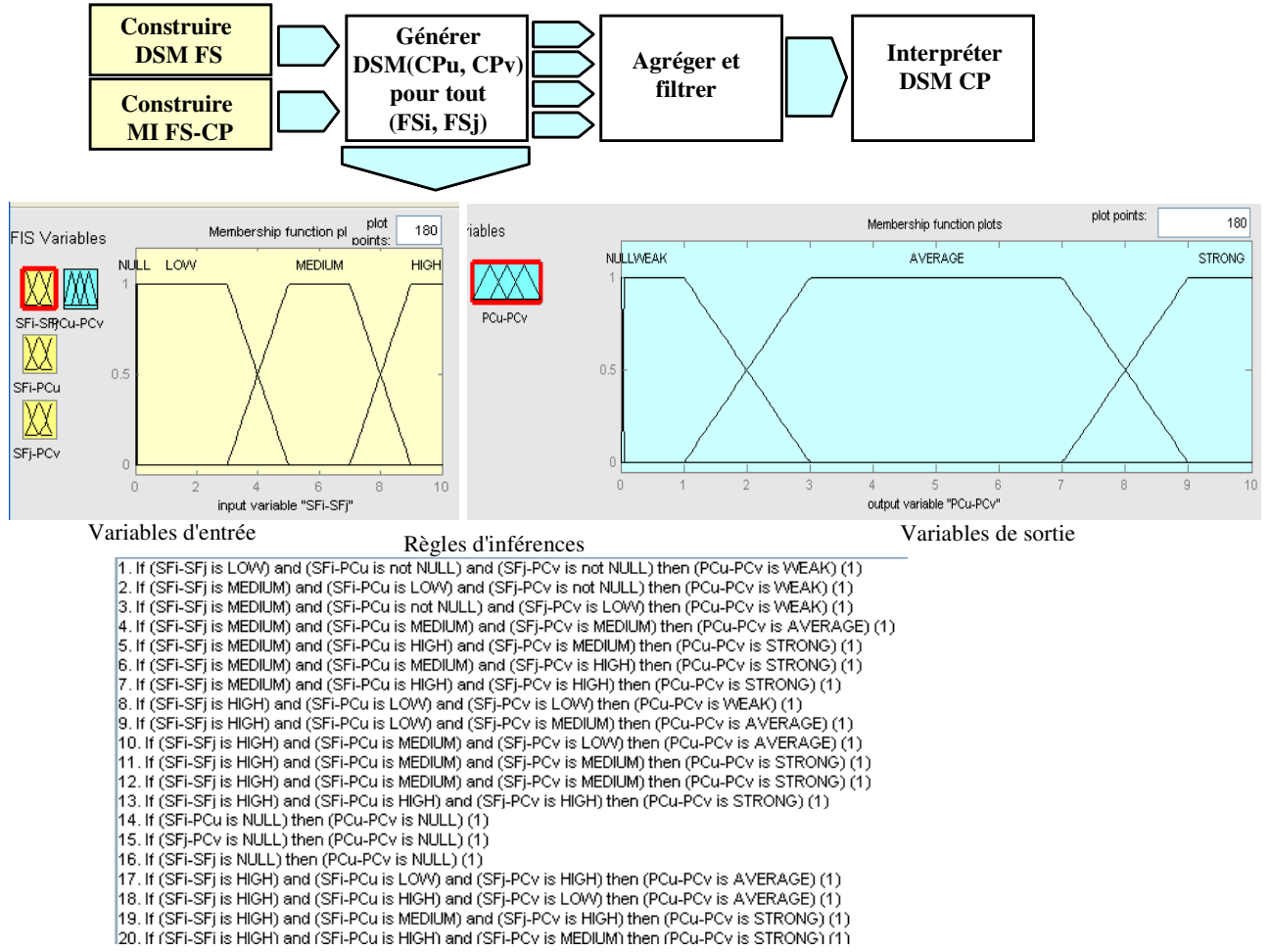


Figure 26 : Architecture du traitement flou dans le cas des domaines FS et CP<sup>52</sup>.

Nous avons choisi d'utiliser la moyenne des contributions comme méthode d'agrégation. Ainsi la valeur finale de l'interaction entre  $\text{CP}_u - \text{CP}_v$  est représentée par l'équation 1. Nous divisons par le nombre de couples  $(\text{FS}_i, \text{FS}_j)$  considérés pour obtenir une valeur comprise entre  $[0, 10]$ .

$$\text{DSM}(\text{CP}_u, \text{CP}_v) = \frac{\sum_i \sum_j \text{DSM}_{(\text{FS}_i, \text{FS}_j)}(\text{CP}_u, \text{CP}_v)}{\text{taille}(\text{DSM}(\text{FS}))^2}$$

Équation 1

Nous ne présenterons pas, dans ce mémoire, le détail du traitement flou et du filtrage que nous avons réalisé. Par la suite, nous allons reprendre l'exemple de l'identification de l'architecture d'un nouveau moteur, traité dans le cadre des travaux de thèse de G. Harmel.

### 5.3.6. Vérification à partir de cas d'architectures "typiques"

Pour vérifier que la méthode donne des résultats cohérents, nous l'avons testée sur des cas d'école simples, pour lesquels l'architecture générée pouvait être facilement construite "à la main". Pour cela, nous avons construit des matrices MI FS-CP et DSM FS selon les cas suivants :

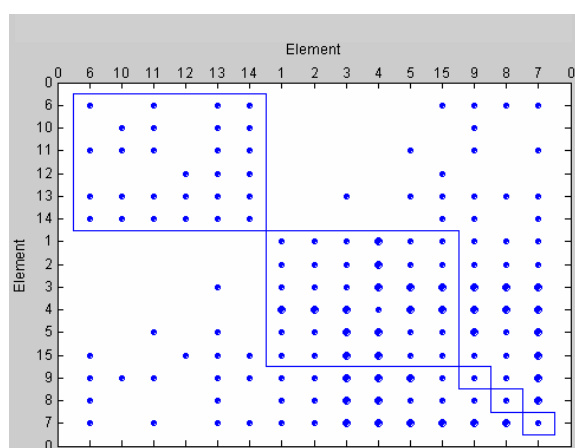
<sup>52</sup> Les règles ont été écrites en Anglais : FS devient SF : System Function et CP devient PC : Product Component.

- Cas 1 : la DSM FS a une architecture modulaire, la MI FS-CP réalise une allocation blocs par blocs des fonctions vers les composants. Nous avons alors vérifié que la DSM CP révèle alors aussi une architecture modulaire.
- Cas 2 : idem au cas précédent et en plus, un composant ( $CP_k$ ) contribue à la réalisation de nombreuses fonctions. Nous avons vérifié que la DSM CP révèle alors une architecture hybride, dans laquelle  $CP_k$  est élément intégrateur et le reste de la DSM est modulaire.

Cette vérification est un premier pas pour l'application de la méthode sur des cas plus complexes.

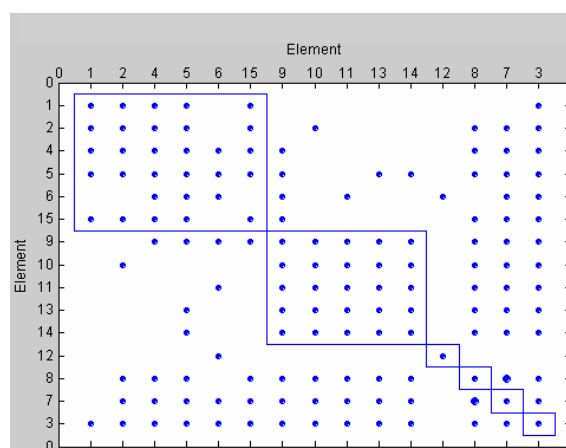
### 5.3.7. Validation (partielle) à partir d'un exemple industriel

Nous reprenons les données concernant la conception du moteur. La DSM CP est simulée à partir de la DSM FS et de la MI FS-CP. Après application de l'algorithme de *clustering*, nous pouvons comparer l'architecture obtenue (Figure 27) avec l'architecture attendue pour laquelle la DSM CP est construite directement avec l'architecte système (Figure 28).



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
EGR	Injection	Culasse	Admis.	Echapp.	Distrib.	Attelage mobile	Carter	Lubrifi.	Entraîn. Access.	Entraîn. Synchro.	Circuit de vide	Circuit caloport.	GES.	CC

**Figure 27 : Architecture simulée du domaine des composants**



**Figure 28 : Architecture attendue du domaine des composants construite par les architectes**

L'architecture simulée peut être interprétée ainsi :

- Le premier module est composé de 6 composants : EGR, injection carburant, culasse, admission d'air, échappement, "capteurs et commande". Ces composants forment la partie supérieure du moteur et contribuent à générer l'énergie thermique.
- Le second module est aussi composée de 6 composants : distribution, entraînement accessoires, entraînement synchrone, circuit de vide, circuit caloporteur, "générateur et stockage d'énergie". La plupart de ces composants forment la partie inférieure du moteur et contribue à transférer l'énergie cinématique du moteur.
- Trois éléments sont identifiés comme intégrateurs : attelage mobile, carter, lubrification.

Les architectes système ont reconnu l'importance des éléments identifiés comme intégrateurs puisqu'ils ont réellement de multiples interfaces avec les autres composants. Les deux modules identifiés semblent cohérents du point de vue du fonctionnement du moteur et confirment des choix de conception antérieurs. Pour aller plus loin dans l'analyse des résultats obtenus, nous

comparons l'architecture à celle que les architectes ont obtenue, ultérieurement, en construisant une DSM CP manuellement lors de la conception détaillée.

Les deux architectures sont composées de 2 modules importants et 3 éléments intégrateurs :

- Les modules sont presque semblables dans les deux architectures, l'un correspondant à la partie haute du moteur et l'autre, à la partie basse.
- Le composant "distribution" est identifié dans l'architecture attendue comme appartenant à la partie supérieure. Dans l'architecture simulée, ce composant appartient au module de post-combustion. Cette différence peut être expliquée par le fait que dans son cycle de fonctionnement, la distribution dépend de la chaîne cinématique de la partie inférieure du moteur. Ainsi, dans l'architecture simulée, la dépendance cinématique apparaît être plus forte que les interfaces physiques avec les composants de la partie supérieure du moteur.
- Dans l'architecture réelle, le circuit de vide a peu de liens avec les autres composants et est un module à lui seul. Selon l'architecte système, les intensités de couplage entre ce composant et les FS ont peut-être été surestimées dans la matrice d'incidence.

Les autres différences entre les deux architectures sont liées à l'identification des éléments intégrateurs.

- Dans l'architecture attendue, les composants intégratifs sont le carter, l'attelage mobile et la culasse. Ces composants réalisent la cohésion physique du moteur extérieurement et intérieurement. Ils sont couplés avec plus de 75% des autres composants. Dans l'architecture simulée, nous notons que le carter et l'attelage mobile sont identifiés comme éléments intégrateurs, mais pas la culasse. Cela peut venir du fait que la culasse crée une cohésion globale entre les composants en réalisant une fonction technique de conception qui ne se retrouve pas dans ses interactions avec les fonctions système. Cependant, ce composant crée aussi une cohésion interne physique dans la partie haute du moteur. Pour vérifier la pertinence de l'architecture attendue, il serait nécessaire de remettre en cause les valeurs des couplages avec la culasse.
- La dernière différence est l'identification de la lubrification comme élément intégrateur dans l'architecture simulée. Lorsque l'on regarde ses interactions dans l'architecture attendue, on peut s'apercevoir que ce composant est couplé à un grand nombre d'autres composants et pourrait donc être considéré comme intégrateur. Cela dépend du choix de l'architecte système.

Ainsi, après interprétation des résultats, les architectures obtenues sont globalement cohérentes mais nécessiteraient une analyse plus détaillée pour trois composants : la culasse, le circuit de vide et la distribution.

D'une façon générale, les différences constatées peuvent provenir des causes suivantes :

- La matrice d'incidence n'est pas remplie correctement et nécessite d'être améliorée. Ceci est important puisqu'elle matérialise les allocations des composants aux fonctions et leur traçabilité.
- Les choix d'architecture réelle peuvent être volontairement différents de l'architecture simulée. Les architectes devront alors être attentifs, lors de modifications ultérieures pour bien les propager manuellement ou lors de la phase d'intégration et validation.

Enfin, dans le cas, où les deux architectures sont semblables, cela permet de justifier le choix d'architecture organique et de valider la cohérence de la matrice d'allocation.

### 5.3.8. Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité est utile pour estimer l'influence de données ou de paramètres imprécis sur les résultats obtenus. Nous avons résumé les résultats de cette analyse dans l'Annexe 3. Le lecteur pourra s'y reporter pour obtenir des approfondissements.

En synthèse, nous avons constaté que, concernant l'imprécision des valeurs dans les matrices d'entrée, jusqu'à un écart-type inférieur à 1, les erreurs de sortie sont globalement "acceptables". Concernant les paramètres du traitement flou, quand nous effectuons des changements qui restent cohérents avec le but de la méthode de propagation, l'impact mesuré reste acceptable. Enfin, pour inclure l'algorithme de *clustering* dans l'analyse de sensibilité, nous avons mesuré le nombre moyen d'éléments qui ont changé de cluster. Dans ce cas, nous pouvons conclure à une bonne stabilité des clusters tant que moins de 60% des valeurs de la matrice IM sont inchangées.

### 5.3.9. Éléments de validation et synthèse

Les trois types de tests décrits au §5.3.1 et susceptibles de valider la méthode ont été réalisés. Le Tableau 21 donne une estimation des exigences souhaitées.

Qualités attendues	Estimation	Risques – limites
Identification d'une architecture, interprétable	+	Problème des éléments intégrateurs qui tendent à tout coupler
Peu sensible aux imprécisions	+	Exigences difficiles à satisfaire sur des matrices denses
Sensible à des changements significatifs	+	
Proche du raisonnement qualitatif d'un expert	+	

**Tableau 21 : Estimation qualitative des exigences et risques associés**

Les tests réalisés ont montré qu'une forte densité des matrices DSM FS et/ou MI FS-CP ainsi que l'existence d'un ou plusieurs éléments intégrateurs ont tendance à coupler tous les éléments de la matrice DSM CP. Dans le cas où les architectures recherchées sont intégrales, la méthode a peu d'intérêt. Dans les autres cas, nous avons recommandé d'utiliser des règles de construction des matrices afin de limiter leur densité<sup>53</sup> et le nombre de valeurs fortes. Pour la matrice MI, les règles de construction recommandées par la conception axiomatique peuvent être intéressantes : à une fonction correspond un paramètre physique principal.

En se basant sur la typologie d'architecture d'Ulrich [1995] et sur la définition des modules, la méthode de propagation permet à l'architecte système, dès les phases de conception préliminaire, de simuler les architectures des domaines du produit et, si elles sont satisfaisantes de son point de vue, les utiliser pour **justifier les choix d'architecture** en vérifiant la cohérence à la fois des modules et des allocations, entre les strates fonctionnelle et organique. En effet, des écarts observés entre ce qui a été simulé et ce qui a été décidé peuvent révéler des risques lors de l'intégration du système.

D'autres tests sont certainement nécessaires pour valider la méthode ou pour montrer l'intérêt de raffinements ultérieurs. Nous y reviendrons dans les perspectives de cette partie.

<sup>53</sup> Selon S. Eppinger, son expérience lui a montré qu'une densité de 60% correspond à un bon niveau de documentation des interactions dans les DSM.

## 5.4. Contribution à la modélisation de l'architecture d'une famille de produits et de génération des variantes

Dans cette section, nous allons présenter une méthode de modélisation d'une famille de produits et de génération des variantes, développée dans le mémoire de thèse de B. Mtopi. Le lecteur pourra se reporter à l'Annexe 9 (article dans JESA), pour obtenir plus de détails sur cette méthode.

### 5.4.1. Qualités attendues et structure générale de la méthode

Les qualités attendues de la méthode recherchée sont :

- E1 : Supporter la modélisation de l'architecture d'une famille de produits.
- E2 : Permettre la génération des variantes.

La première étape de cette méthode consiste en l'élaboration d'une Structure Générique de Produit, qui permet de représenter la diversité technique retenue pour satisfaire la variété attendue par les clients. Les étapes suivantes nécessitent le choix d'un langage formel pour la modélisation de l'architecture d'une famille de produit et pour la génération de variantes. Dans la thèse de B. Mtopi, après analyse de l'intérêt et des limites de différents langages formels, nous avons opté pour les grammaires de graphe. La seconde étape consiste alors en la modélisation des interfaces et de la structure interne. La dernière étape requiert la modélisation d'un diagramme de contrôle, permettant ensuite la génération des variantes.

Pour montrer le caractère opératoire de cette méthode, nous l'appliquons à la conception d'une famille de cuisine intégrée, à partir de données collectées dans une collaboration avec l'entreprise Cuisines Legrand (25).

### 5.4.2. Etude de cas

La cuisine intégrée est par excellence un produit à forte diversité et à caractère modulaire. Ce type de meubles est constitué d'éléments organisés en caissons, portes, quincailleries, poignées et boutons remplissant différents rôles : éléments sous évier, éléments de rangement, éléments d'angle. La diversité est obtenue par le choix des formes (type de moulure, type de contournement...), des finitions (placages, coloris, types de vernis...), des quincailleries (poignées, boutons, piètement,...), le nombre de tiroirs, des dimensions multiples, etc.

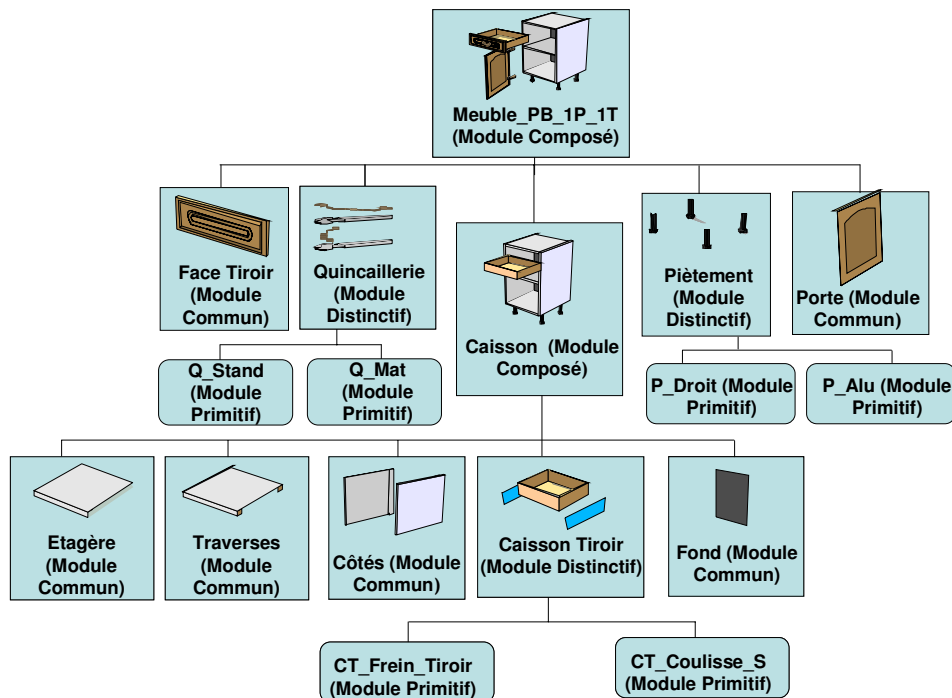
Nous nous sommes intéressés à un meuble de rangement bas. Il constitue la famille de produits "Meuble Partie Basse, Une Porte, Un Tiroir" (MPB\_1P\_1T) et est représenté sur la figure xxx.

### 5.4.3. Structure Générique de Produit (SGP) d'une famille de produits

La première étape de modélisation d'une famille de produit est l'élaboration d'une Structure Générique de Produit. Nous allons illustrer cette étape à partir de l'exemple de conception d'une famille de cuisine intégrée.

A partir des définitions de la section 4.4.2, la Structure Générique de Produit de la famille de meubles est représentée sur la Figure 29. Les sous-systèmes communs ou composants à partir desquels les variantes d'un produit peuvent être obtenues seront dénommés "produit de base" (ou plateforme). Dans la pratique, le produit de base peut prendre plusieurs formes. Il peut être un produit avec les fonctionnalités de base, un produit semi-fini ou un produit standard qui remplit les exigences de la majorité des clients. Du point de vue technique, le produit de base matérialise la commonalité dans une famille de produits.

Dans notre exemple (Figure 29), le produit de base est constitué des modules communs fond (FOND), côtés (COTE), traverse haute (TRA\_H), traverse basse (TRA\_B) et étagère (ETAG) ainsi que des autres modules en interaction avec le caisson, ici le module porte (PORT).



**Figure 29 : Représentation de la SGP d'une famille de meuble "Partie Basse Une Porte Un Tiroir"**

Cette structure arborescente est utile pour visualiser la diversité dans la famille et identifier une plateforme mais elle ne représente pas les interactions entre les constituants, ni les conditions d'existence des différents modules primitifs.

#### 5.4.4. Modélisation de l'architecture d'une famille de produits par les grammaires de graphe : principe général

Les grammaires de graphe représentent un outil intéressant pour la modélisation des familles de produits surtout pour leur caractère génératif.

Cet outil a le double avantage de s'appuyer sur une formulation mathématique et sur des représentations graphiques. Son choix pour la modélisation d'une famille de produits est justifié car il permet de mettre en évidence les liaisons complexes entre les modules et composants de la famille à travers l'identification des liaisons (arcs étiquetés) ainsi que la manipulation de la génération des variantes.

L'approche par les grammaires de graphe a pour point de départ la structure générique de produit s'appuyant sur la notion fondamentale de modules, communs ou distinctifs.

Les entités de famille de produits relatives aux éléments de grammaire de graphe (produits, produits de base, modules) sont représentées par des graphes. Les modules sont modélisés comme des nœuds, les interconnexions (interfaces) entre ces modules comme des arêtes et les paramètres de modules comme attributs du nœud.

Le graphe du produit est formalisé par des graphes attributs et encapsulés. L'architecture modulaire d'une famille de produits conduit à la manipulation de productions, basées sur quatre opérations de base : ajout, élimination, échange et ajustement.

Les combinaisons des modules ainsi que les conditions relatives au moment où ces combinaisons doivent être mises en place sont modélisées respectivement comme opérations et conditions d'application des règles de production.

En adoptant le concept de grammaire de graphe par attribut programmé (Programmed Attributed Graph Grammars, PAGG) [Bunke, 1982], la séquence pour l'exécution d'un ensemble de productions est exprimée par un diagramme de contrôle.

La description statique d'une famille de produits est composée des notations de ces grammaires de graphe. Les variantes de la famille de produits peuvent être décrites par application des règles de production tributaires du diagramme de contrôle pour modifier le graphe initial, graphe représentant le produit de base (ou initial). Les graphes résultants sont les modèles des variantes désirées.

Tous ces graphes composent le langage de cette grammaire, qui décrit l'espace de conception de la famille de produits.

#### 5.4.5. Modélisation des interfaces et de la structure interne : graphe encapsulé

Pour caractériser les interfaces externes et les structures internes des modules, on utilise la notion de graphe encapsulé. Le concept de graphe encapsulé a été introduit par [Engels et Schürr, 1995]. Il est utilisé pour décrire différents niveaux d'abstraction de systèmes hiérarchiques.

Dans le cas du caisson, la première étape consiste à définir les graphes encapsulés du produit de base et de chaque module distinctif. La Figure 30 présente le graphe encapsulé du produit de base.

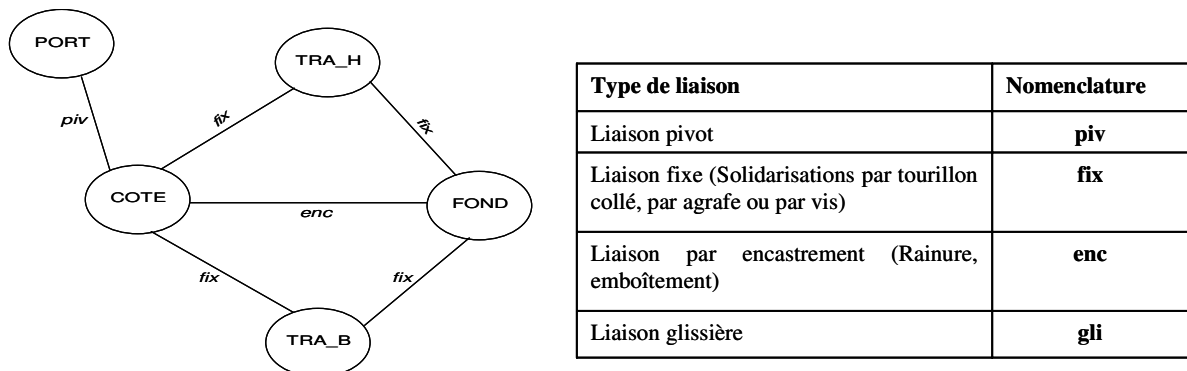


Figure 30 : Graphe encapsulé du produit de base

La Figure 31 représente le graphe encapsulé du module distinctif "caisson tiroir à frein tiroir" (CT\_FT). Les types d'interaction (ici, les liaisons cinématiques) sont également matérialisés.

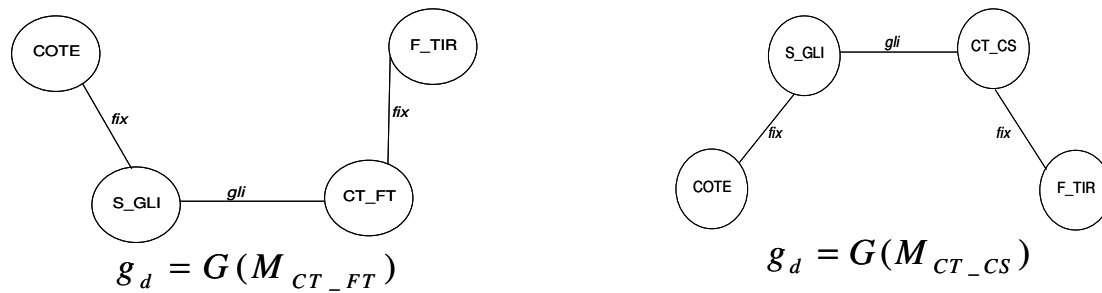


Figure 31 : Graphe encapsulé du module distinctif "Caisson Tiroir à Frein Tiroir" et "Caisson Tiroir à Coulisse Standard"

#### 5.4.6. Modélisation de la variété

Basée sur l'architecture modulaire, la variété des produits s'obtient par des combinaisons variées de modules [Ulrich, 1995]. Elle résulte aussi des modifications topologiques ou de la variation des attributs du sommet. La génération de la variété se définit comme une spécification des transformations de l'état des graphes associés. La variété résulte de quatre opérations de base [Ulrich, 1991 ; Du *et al.*, 2002] : l'ajout, l'élimination, l'échange et l'ajustement de module.

- Ajout : Un module, apportant des caractéristiques fonctionnelles nouvelles, peut être ajouté au produit de base, pour donner une nouvelle variante de produit. Il s'agira, par exemple, d'un accessoire optionnel. Le fait d'ajouter un module nécessite des interfaces appropriées sur le produit de base.
- L'élimination : Une autre manipulation de module est obtenue par le retrait d'un module, possédant des fonctions dont n'a pas besoin le client. Ce module est retiré, soit dans le but d'avoir un produit simplifié et plus économique, soit pour ensuite ajouter un autre module (cf échange).
- L'échange : lorsque, pour une même fonction, il existe plusieurs réalisations technologiques, il est possible de procéder à une opération d'échange (combinaison d'élimination et ajout). Plusieurs modules ayant des performances différentes peuvent réaliser la même fonction. La variété est alors due au niveau de performance requis. Cela nécessite que les modules possèdent la même interface.
- L'ajustement : cette opération permet d'introduire des ajustements de certains modules (par exemple, attributs variables sur des dimensions, sur des puissances électriques, ...) sans que l'architecture globale du produit ou les technologies utilisées ne soient modifiées. Les règles de validité de la production associée devront préciser les conditions d'application de l'ajustement.

#### 5.4.7. Génération des variantes

##### 5.4.7.a.Principe général

La génération des variantes obtenue par des combinaisons de modules est réalisée par une séquence d'opérations de base. Ces différentes combinaisons sont modélisées par l'application des productions qui sont synchronisées à travers la définition des **conditions** d'application (liées aux choix du client, à des règles ou contraintes technologiques) et le contrôle de l'ordre d'exécution des dites productions, piloté par un **diagramme de contrôle**.



### 5.4.7.b. Etude de cas

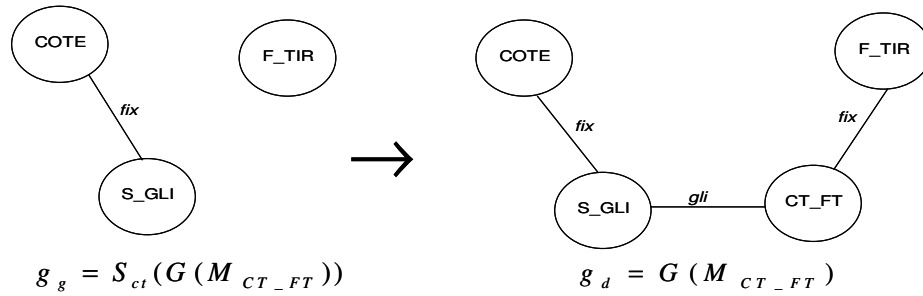
L'exécution normale des productions nécessite de détailler les spécifications de la famille de produits MPB\_1P\_1T en termes de fonctions communes, optionnelles et de contraintes de sélection. Nous illustrerons seulement l'ajout de modules.

Pour le caisson, le client peut exiger aussi bien un module face tiroir muni d'un système d'ouverture à poignée, nécessitant le module CT\_CS qu'une face tiroir ayant un système d'ouverture à bouton nécessitant le module CT\_FT. Certains clients peuvent exiger les deux modules, CT\_FT + CT\_CS. La fonction optionnelle sera matérialisée par la relation suivante :

$$\begin{cases} F_{SO\_FT} : \text{système d'ouverture face tiroir} \\ \text{option}_{SO\_FT} \in \{CT\_FT, CT\_CS, CT\_FT \text{ et } CT\_CS\} \end{cases}$$

La production  $P_{CT\_FT}$ , présentée à la Figure 32, permet d'ajouter le caisson tiroir à frein tiroir CT\_FT (sommet CT\_FT) au produit de base.

Les graphes qui sont à gauche et à droite du symbole sont respectivement la partie gauche du graphe (PGG) et la partie droite du graphe (PDG) des productions associées.



**Figure 32 : Production  $P_{CT\_FT}$  représentant l'ajout du module "Caisson Tiroir à Frein Tiroir"**

On remarque que la PGG de la production est constituée des sommets de contextes du graphe encapsulé du "caisson tiroir à frein tiroir" tandis que la PDG représente le graphe encapsulé du même "caisson tiroir à frein tiroir".

La production  $P_{CT\_CS}$ , semblable à la précédente, permet d'ajouter le module CT\_CS (sommet CT\_CS) au produit de base au cas où le système d'ouverture de la face tiroir du caisson est muni d'une poignée, soit CT\_CS ou CT\_CS + CT\_FT.

### 5.4.7.c. Définition du diagramme de contrôle

Obtenir une variante de produit peut impliquer plus d'une étape dans la modification du produit de base. Le processus visant à modifier un produit de base pour un client peut être modélisé comme une série de dérivations du graphe en appliquant des règles de production dans un ordre donné.

La définition des diagrammes de contrôle a pour objectif de spécifier l'ordre d'application des productions. La Figure 33 représente le diagramme de contrôle pour la famille de produit caisson. En dehors du sommet initial I et du sommet final F, tous les sommets sont étiquetés par des productions. Le diagramme a deux sommets (hors I et F) qui sont les productions  $P_{CT\_FT}$  et  $P_{CT\_CS}$ . Les variantes du produit sont obtenues en parcourant le diagramme. Chaque chemin indique un processus de génération possible d'une variante.

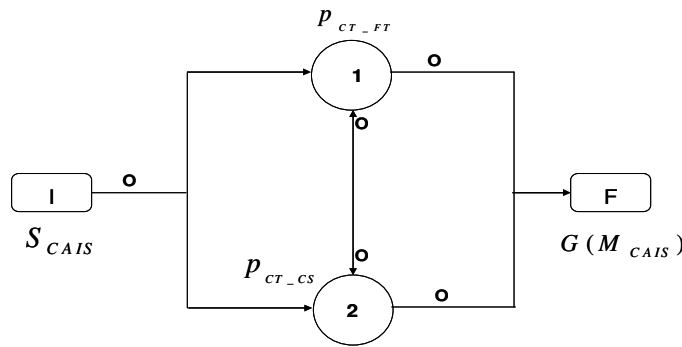


Figure 33 : Diagramme de contrôle

#### 5.4.7.d. Dérivation de variante

La structure hiérarchique des produits est considérée comme une collection de modules composés, organisés à travers plusieurs niveaux d'abstraction. La dérivation de variante de produit sera un processus récursif, générateur de tous les modules composés. Une fois le niveau le plus bas atteint, les modules fils des modules composés ne sont autres que les modules primitifs ou communs, par conséquent la détermination des variantes de ces modules composés peut se faire localement.

Le processus de génération de ces variantes est décrit dans [Du *et al.*, 2002], l'application faite dans le cas de la famille de meubles est présentée dans la thèse de B.Mtopi, 2006 [Th.1].

#### 5.4.8. Eléments de validation et synthèse

Cette section a présenté une modélisation par les grammaires de graphes, de la diversité dans une famille de produits, ainsi que de son architecture. Les grammaires de graphe représentent un outil intéressant pour la modélisation des familles de produits. Son choix pour la modélisation d'une famille de produits est justifié car cet outil mathématique permet de mettre en évidence les liaisons complexes entre les modules et composants de la famille à travers l'identification de ces liaisons (arcs étiquetés) (Exigence E1, §5.4.1, p.99) ainsi que la génération des variantes (Exigence E2). Elles permettent une description hiérarchisée des produits faisant correspondre les décompositions aux différentes règles de réécriture. L'utilisation des règles de génération des variantes permet de formaliser des connaissances sur les produits. L'application du modèle sur une étude de cas industriel démontre le potentiel apporté par ce type de modélisation.

Des travaux sur la configuration de produits (application aussi dans une famille de meubles) ont été présentés dans [Aldanondo *et al.*, 2007]. Nous pensons qu'ils sont complémentaires à notre proposition. Contrairement à la modélisation du produit par graphes que nous proposons, le modèle produit n'est ni structuré, ni hiérarchisé (le produit est vu comme un ensemble de composants représenté par une nomenclature en râteau). La variété est générée par des mécanismes de résolution et de propagation de contraintes. Par contre, l'intérêt de la proposition des auteurs réside dans l'utilisation de leur formalisme de configuration de produit pour générer la configuration de sa gamme de production.

### 5.5. Bilan et perspectives

Dans ce chapitre, nous avons développé une contribution à l'amélioration d'un algorithme de *clustering*. Nous avons testé les améliorations proposées sur des cas d'école, en comparant les résultats obtenus avec ceux de l'algorithme original, et ce, au regard de cinq exigences de qualité. Nous l'avons validé sur diverses applications industrielles, concernant la conception de moteurs ou de boîtes de vitesse. Ce travail n'a pas encore été publié.

Nous avons ensuite présenté une méthode de propagation des choix d'architecture d'un domaine vers un autre. Cette méthode exploite le formalisme matriciel des DMM et des DSM en recourant à des axiomes de propagation et à un traitement flou, en raison du caractère imprécis des données manipulées, construites par les acteurs du projet. Nous avons défini les qualités attendues d'une telle méthode et avons apporté des éléments tangibles de validation (test sur une application industrielle, analyse de sensibilité). Cette méthode a été publiée dans un papier court [R.9]. Des travaux semblables ont été publiés dans des communications internationales [CI.31, 32].

Enfin, nous avons résumé une méthode de modélisation de l'architecture d'une famille de produits et de génération des variantes, avec utilisation des grammaires de graphe. Pour tester la pertinence de cette méthode, nous l'avons appliquée sur des données issues de la conception d'une famille de cuisine intégrée. Ce travail a fait l'objet d'un article dans la revue JESA [R.11] (Tableau 22).

Thèmes	Publications associées
Identification d'une architecture modulaire, propagation des choix d'architecture	[R.8], [CI.31], [CI.32]
Architecture d'une famille de produits et génération de variantes	[R.11], [CI.12], [CI.13], [CI.14]

**Tableau 22 : Bilan quantitatif de la partie IV**

Dans cette section, nous décrivons les perspectives de recherche qui découlent des contributions précédentes, plus précisément de leurs limites ou d'extensions envisageables, à court terme. Ces perspectives pourraient faire l'objet de sujet de thèse.

### **Modélisation et sensibilité**

D'un point de vue modélisation, les travaux de Pimmler et Eppinger [1994] ont permis de définir une typologie opérationnelle des interactions qui peuvent être modélisées dans les DSM. Les auteurs proposent une échelle entre  $\{-2 ; -1 ; 0 ; 1 ; 2\}$  et quatre types de flux. De nombreuses autres échelles ont été utilisées dans la littérature :  $\{0 ; 0,5 ; 1 ; 2\}$  [Thebaud, 2001],  $[0, 10]$  ou le plus souvent, une évaluation binaire  $\{0 ; 1\}$ . Des méthodes de conception comme QFD conseillent d'utiliser une échelle exponentielle  $\{0 ; 1 ; 3 ; 9\}$  pour marquer fortement les différences entre les évaluations des experts.

Parmi les travaux existants dont nous avons pris connaissance, nous n'avons pas trouvé d'analyse comparative concernant l'influence du choix d'une échelle sur la qualité des résultats obtenus par un algorithme de *clustering*. Seul Thebaud [2001] indique qu'une échelle  $\{0 ; 0,5 ; 1 ; 2\}$  permet d'obtenir de meilleurs résultats de *clustering* qu'avec une échelle binaire. Ce résultat intuitif mériterait d'être approfondi car le corollaire du choix d'une métrique est la sensibilité de l'algorithme. Dans le cas d'une échelle discrète, un écart d'estimation sur l'intensité d'un couplage revient à considérer une inexactitude sur l'information (erreur de jugement) qu'il est alors difficile de distinguer d'un changement de modélisation. Dans le cas d'une échelle continue, nous pouvons séparer une imprécision (faible écart) et un changement volontaire de modélisation (écart plus fort sur la valeur). A notre connaissance, ce type d'analyse n'est pas mené lors de la proposition d'algorithme nouveau.

### **Propagation des décisions d'architecture fonctionnelle sur l'architecture organique**

La méthode de propagation que nous avons proposée ne tient pas compte d'un éventuel choix d'architecture fonctionnelle ou d'allocation par blocs. Il pourrait être utile d'adapter l'algorithme pour pondérer les contributions lors de l'agrégation afin de tenir compte d'éventuels choix d'architecture fonctionnelle préalable. L'identification des modules dans le domaine physique devrait alors être facilitée. Il est alors intéressant de tester la méthode de propagation sur des changements de décisions d'architecture fonctionnelle, pour vérifier si cela a un impact sur l'architecture physique. Actuellement, nous avons modélisé les règles avec les valeurs présentes dans les matrices. Il pourrait être préférable, dans le cas de propagation de changement, de modéliser des règles sur des écarts de valeur, en attribuant à la matrice d'allocation une sémantique semblable à une matrice de conception, dans la conception axiomatique (une valeur représente le degré de sensibilité d'un paramètre de conception par rapport à une variation d'exigence fonctionnelle). Une méthode de propagation basée uniquement sur des traitements matriciels a cependant une limite : elle ne peut pas tenir compte du fait que dans la réalité, des choix dans le domaine physique contraignent aussi le domaine fonctionnel (reconduction d'un module, d'un composant ou d'une interface). Nous reviendrons sur ce challenge dans les perspectives générales.

### **Propagation de l'évolution d'un module au sein d'un système**

Lors de l'évolution d'un ou plusieurs modules en phase de reconception d'un système, l'architecte a besoin de propager les modifications à l'intérieur de l'architecture de ce système afin d'identifier les interfaces ou les composants susceptibles d'être impactés par cette modification. Une équipe de recherche à Cambridge (Angleterre) travaille sur cette thématique [Clarkson *et al.*, 2004] et utilise une représentation de l'architecture du système par une DSM composant. Notre approche par les DSM pourrait être améliorée pour permettre de propager des modifications à la fois dans les architectures fonctionnelles et organiques et pour estimer sur chaque composant le risque qu'il soit impacté par les modifications.

### **Modélisation floue et *clustering* flou**

Jusqu'à présent, les matrices que nous manipulons sont composées de nombres réels. Une extension possible est de considérer des nombres flous, qui permettraient justement de représenter l'imprécision sur les valeurs en entrée. L'expert pourrait estimer pour chaque élément un niveau d'imprécision sur les valeurs renseignées. De même, les résultats que fournissent les algorithmes de *clustering* sont des partitionnements alors que parfois, plusieurs solutions voisines sont envisageables, le même élément pouvant appartenir à un module ou à un autre. Il pourrait être intéressant de développer un algorithme de *clustering* flou. Il en existe déjà dans d'autres applications comme dans les traitements d'images. La décision du choix d'une solution finale pourrait alors revenir à l'architecte.

### **Comparaison de deux architectures**

Lors de la comparaison des résultats obtenus avec l'algorithme de Thebaud [2001] ou avec l'algorithme que nous avons proposé, nous avons noté qu'il est difficile de comparer deux architectures provenant d'algorithmes n'utilisant pas la même fonction coût. D'ailleurs, nous n'avons pas trouvé de "benchmarks"<sup>54</sup> ou de comparatifs entre les algorithmes existants. Les auteurs se basent essentiellement sur deux critères :

---

<sup>54</sup> L'un des rares jeux de données disponibles à notre connaissance est celui présenté par Fernandez [1998] concernant la conception d'un ascenseur.

- L'algorithme permet de révéler des architectures complexes (modules denses, chevauchement de modules, éléments intégrateurs, architecture 3D ...), interprétables par un expert.
- L'algorithme a une bonne reproductibilité pour converger vers la solution optimale.

Des métriques existent pour mesurer la modularité d'un module. Au niveau d'une architecture, l'agrégation de ces métriques n'est pas satisfaisante pour comparer des architectures différentes.

Une voie de recherche est le développement de métriques permettant de mesurer la distance entre deux architectures, c'est-à-dire entre deux ensembles de partitions. Il semble évident que les travaux sur la modularité feront un saut quantitatif en s'appuyant plus fortement sur les résultats mathématiques de la théorie des graphes ou la théorie de l'information. De nouveaux indices de cohésion utilisant des métriques de la théorie des graphes pourraient être utilisés, comme l'indice d'une clique (clique<sup>55</sup> la plus grande d'un graphe) ou un indice de cohésion structurale (nombre minimum d'éléments qui, s'ils sont retirés du module, désagrégeraient le module). Des travaux récents vont actuellement dans le sens de la recherche d'une métrique "absolue" basée sur la théorie de l'information [Yu T. *et al.*, 2007].

### Optimisation multicritère

L'identification d'une architecture est un problème de conception qui doit tenir compte de l'ensemble du cycle de vie du produit. Or, force est de constater que la majorité des algorithmes de *clustering* existants utilise une métrique basée sur les interactions physiques uniquement pour définir des modules. Les algorithmes retournent alors LA solution dite optimale. Or d'une part, la notion d'optimalité est discutable, d'autre part, l'architecte aurait plutôt besoin de connaître un ensemble de solutions "satisfaisantes". Cette remarque ouvre la voie à deux approfondissements.

Le premier concerne le développement d'un algorithme d'optimisation multicritère pour la définition de modules. Les chercheurs leaders de l'identification d'architecture modulaire (A. Yassine [Yu T. *et al.*, 2007], D. Browning [Engel et Browning, 2008]) se sont lancés récemment dans la recherche d'algorithme d'optimisation "globale". Le but est toujours de retourner la meilleure architecture. Les méthodes d'optimisation avec front de Pareto pourraient être intéressantes mais le nombre de critères pouvant être important, les résultats pourraient être difficilement exploitables. Or le challenge aujourd'hui dans l'aide à la décision est plutôt de fournir un ensemble de solutions voisines (k-optimales, c'est-à-dire à k% de l'optimum) et d'aider l'architecte à faire son choix avec un outil d'aide à la décision multicritère pour comparer l'intérêt des architectures proposées. Ces critères devraient décrire l'ensemble du cycle de vie du produit. La méthode MFD [Erixon 1998] qui permet de prendre en compte des "module drivers" pourrait être une source d'inspiration (son application reste manuelle et repose sur des outils mathématiques simples).

### Modularité et famille de produits

Un second approfondissement devrait faire le lien avec la recherche de modules dans les familles de produits (T. Simpson, F. Alizon [Alizon *et al.*, 2007a]). Nous pensons qu'une piste intéressante est d'adapter la méthode de propagation proposée pour tester la robustesse des modules potentiels. Les DMM qui permettent de coupler des domaines différents (comme les exigences fonctionnelles et les composants) pourraient être utilisées pour modéliser les variantes possibles et simuler l'impact de ces différentes variantes fonctionnelles sur l'architecture physique. Les travaux de [Deciu *et al.*, 2005] sur la modélisation de familles par des sous-ensembles flous pourraient être utilisés, en partie, pour compléter notre approche.

---

<sup>55</sup> Une clique est un sous-graphe dans lequel chaque nœud est relié à tous les autres nœuds du sous-graphe.



## Partie V. Contributions à l'organisation du système de conception

Cette partie se compose des chapitres 6 et 7.

Le chapitre 6 présente un état de l'art sur la conception de l'organisation du système de conception et propose un cadre conceptuel d'analyse et de modélisation des activités de conception.

Le chapitre 7 présente cinq contributions sur l'organisation du système de conception. Elles portent sur la problématique d'une meilleure modélisation et intégration des systèmes de compétences dans le pilotage traditionnel du système de conception :

- Un cadre conceptuel pour le pilotage sociotechnique du système de conception en Ingénierie Système (projet de recherche LAB/PSA ; utilisation du langage UML ; application au système de conception de DPMO ; valorisation dans un chapitre d'ouvrage [Ch1])
- Une méthode de caractérisation d'une compétence en conception (thèse de F. Belkadi ; utilisation de la logique floue et du langage UML ; application sur un projet de conception de meubles ; valorisation dans des revues : [R.4], [R.6], [R.10]).
- Une méthode de constitution d'équipes compétentes pour développer des systèmes mécatroniques, (thèse de O. Hlaouittinun ; utilisation de matrices d'incidence et d'un algorithme de *clustering* ; application sur un cas d'école ; valorisation en revue : [R.8]).
- Une extension des matrices DSM pour structurer les Métiers de la conception (projet de recherche LAB/PSA ; utilisation de DSM connaissances ; application pour une aide à la structuration des acteurs de conception fonctionnelle du GMP au sein de PSA/DPMO ; travail non publié).
- Un outil de qualification et de déploiement d'une compétence stratégique en conception (projet de recherche LAB/PSA ; utilisation d'un arbre multicritère et des DSM; application sur la conception d'une boîte de vitesse robotisée ; valorisation en cours avec un article en révision).

## Chapitre 6. Fondements de l'organisation du système de conception

### 6.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous commençons par définir ce que sont un système de conception et une organisation. Nous présentons ensuite un état de l'art

- sur l'architecture de l'organisation d'un projet,
- sur la constitution d'équipes et
- sur le pilotage des systèmes de compétences.

Il est à noter que nous nous sommes intéressés essentiellement aux méthodes formelles permettant de définir l'organisation d'un projet (par exemple, optimisation des processus de conception, optimisation de la constitution des équipes) ou aux approches formelles visant à mieux intégrer les compétences dans le pilotage des processus de l'entreprise.

Nous présentons enfin différents aspects de l'analyse des activités de conception : dialogues, organisation, pilotage.

### 6.2. Définition d'un système de conception

Nous entendons par système de conception, l'ensemble des ressources, humaines et techniques (on parle de système sociotechnique) et des processus permettant de concevoir de nouveaux produits. Un processus peut être qualifié de "technique", "d'entreprise"<sup>56</sup>, "de management de projet" ou "contractuel" [ISO 15288], en fonction de son objectif et de l'objet sur lequel il porte. Deux structures organisationnelles sont généralement distinguées et posées comme complémentaires dans les systèmes de conception : une structuration par Métiers (ou services, départements) et une structuration par projets. Elles répondent chacune à une logique spécifique :

- développer les connaissances, les bonnes pratiques et les compétences propres à un Métier, avec un horizon temporel à moyen/long terme ;
- faciliter la communication entre personnes de différents Métiers en créant des équipes projet, structurées autour de processus trans-fonctionnels. Le but est d'accélérer les flux de conception et d'améliorer la qualité du produit, en incitant à des résolutions de problèmes collaboratifs. Les objectifs d'un projet portent généralement sur un horizon à court/moyen terme.

Nous distinguons :

- le métier d'une personne, qui peut correspondre à une fonction clé dans les projets de conception, comme par exemple, le métier d'architecte système et
- le Métier, au sens d'un service ou département de conception regroupant plusieurs personnes de métiers, éventuellement différents mais proches.

---

<sup>56</sup> Selon [ISO 15288], the enterprise processes "provide resources and infrastructure necessary to support projects and ensure the satisfaction of organizational objectives and established agreements." One of the enterprise processes is the "resource management process". "This process provides resources, materials and services to projects to support organization and project objectives throughout the life cycle. This includes a supply of educated, skilled and experienced personnel qualified to perform life cycle processes." Le pilotage des systèmes de compétences est ainsi inclus dans ce type de processus : "Maintain and manage the pool of personnel necessary to staff ongoing projects".



Par exemple, au sein de DPMO que l'on considérera comme le système de conception, nous pouvons citer les métiers de "Responsable synthèse prestation", "responsable conception système" et "pilote fonctionnel système". Ces métiers concernant des acteurs individuels appartiennent au Métier de Conception Système Motorisation et Transmission (CSMT), qui est un acteur collectif dont le but est de disposer et de développer les connaissances et compétences nécessaires à la spécification fonctionnelle, la modélisation, l'intégration et la validation du système GMP au meilleur niveau mondial (mission du Métier CSMT, sous-système de DPMO).

Les objectifs ambitieux des projets font que trop souvent, les acteurs, sous pression, n'ont pas le temps de capitaliser leurs connaissances, pour partager leurs pratiques (bonnes ou mauvaises) avec les autres membres du même métier. On dit que le projet est égoïste. C'est en partie pour cette raison que se mettent en place, dans le système de conception, des communautés de pratiques, animées par un expert reconnu du métier<sup>57</sup>. La connaissance et la compétence ne se développent pas en dehors de l'activité. Il serait dangereux de penser que le développement des bonnes pratiques peut se faire en dehors des projets par un petit groupe d'experts déconnectés de la réalité des projets. Lors de l'engagement des Métiers dans un projet (formalisé par un plan d'ingénierie), les directeurs des Métiers doivent (ou devraient) négocier des objectifs d'amélioration des compétences de leurs collaborateurs. En particulier, lorsque les dossiers de justification sont bien rédigés, ils constituent une base intéressante pour construire le retour d'expérience du projet vers le Métier. Ces dossiers ne doivent pas être sacrifiés pour privilégier les performances opérationnelles du projet.

Cependant, les principes de structuration d'un Métier sont variés et se combinent souvent autour du produit, des activités de conception et des technologies clés à maîtriser. En réalité, il n'existe pas à notre connaissance de travaux formels permettant de déterminer comment structurer les Métiers de la conception. Pour des approches structurelles des Métiers, le lecteur pourra consulter les travaux de Bouchikhi sur le processus de structuration d'un Métier spécialisé sur la micro-informatique au sein de la RATP [Bouchikhi 1990]<sup>58</sup> ou les travaux de Midler en collaboration avec Renault [Midler 1993]. Comme nous allons le voir, les approches de constitution des équipes de conception sont plus nombreuses mais comportent encore des verrous scientifiques importants, en relation avec la modélisation des compétences et de leur évolution.

### 6.3. *Concept d'organisation*

Le terme "organisation" a de multiples significations. Il peut s'agir de l'action d'organiser un système, du résultat de l'organisation, ou d'une entité "entière" comme une entreprise, un bureau d'études ou une association.

Nous choisissons la définition suivante de l'organisation du projet : c'est le résultat de la structuration du projet qui consiste à définir le processus<sup>59</sup> particulier adapté aux objectifs et au contexte de ce projet, à affecter des acteurs aux tâches et à définir leurs responsabilités (missions, liens hiérarchiques, relations) ainsi que les moyens et procédures de communication et de contrôle. Nous n'incluons pas, dans le concept d'organisation, la planification temporelle des tâches que nous considérons comme de la conduite de projet.

Dans son activité organisationnelle, l'architecte système doit définir l'organisation du projet la plus appropriée pour optimiser la conception du système-produit. Nous parlerons de l'architecture

---

<sup>57</sup> Par exemple chez PSA/DPMO, on parle de "responsable cœur de compétences en Architecture commutation/actionnement" et de "père technique différentiel" ou "père technique actionneur". Ils sont chargés d'animer le retour d'expérience entre différents concepteurs répartis sur plusieurs projets.

<sup>58</sup> L'approche constructiviste de la structuration des organisations, proposée par Bouchikhi, est remarquable puisqu'il emprunte des concepts à la fois à la théorie des schèmes développée par J. Piaget et à la théorie de la structuration des systèmes sociaux d'A. Giddens. Il présente alors comment les individus, les structures organisationnelles et leur environnement co-évoluent.

<sup>59</sup> Voir en Annexe 4 : la définition des concepts clés

de l'organisation du projet pour désigner les architectures fonctionnelle (c'est-à-dire la structure du processus de conception) et organique (c'est-à-dire un regroupement de concepteurs en équipes avec leurs interactions<sup>60</sup>), tout comme nous parlons d'architecture du produit. Un projet peut être considéré comme un processus de fonctionnement du système de conception. Certains projets, reliés à des processus supports dont le résultat sert à améliorer le fonctionnement du système de conception, portent sur le développement de nouveaux moyens ou méthodes de conception. Enfin, un système de conception n'est pas composé que de projets. Certains acteurs du système de conception peuvent mener des activités en dehors de leur implication dans un projet : résolution de problèmes dans des groupes ad hoc, enrichissement de leurs connaissances par des comparatifs technologiques ("*benchmarking*"), par des visites de salons professionnels, Etc.

Dans la suite de ce chapitre, nous présentons un état de l'art essentiellement centré sur la conception de l'organisation d'un projet, avec un point de vue tourné vers l'aide à la décision et l'optimisation. Nous n'aborderons pas les travaux traitant les aspects sociologiques ou purement managériaux.

## 6.4. *Sur l'architecture de l'organisation d'un projet*

### 6.4.1. Etat de l'art

Les travaux de recherche qui se sont intéressés à l'architecture de l'organisation d'un projet peuvent être classés en grandes thématiques :

- Optimisation des processus de conception : [Eppinger *et al.*, 1994 ; Altus *et al.* 1996 ; Browning, 1998 ; Tang *et al.* 2000 ; Cho et Eppinger, 2001 ; David *et al.*, 2002 ; Chen S.J. et Lin, 2003 ; Yassine et Braha, 2003 ; Whitfield *et al.* 2005]. Ces travaux utilisent les DSM-processus pour modéliser des contraintes de précédence et pour proposer une optimisation des processus en limitant soit le nombre total d'itérations, soit les itérations entre groupes de tâches. Ils facilitent aussi le chevauchement des tâches indépendantes. Ils préconisent ainsi de créer des équipes cohérentes en affectant chaque groupe de tâche à une équipe. Certains travaux simulent un planning de conception pour choisir un scénario optimal.
- Décomposition de l'organisation en équipes de conception [Zakarian et Kusiak, 1999 ; Braha, 2002 ; Tseng *et al.*, 2004 ; Chen S.J., 2005]. Les auteurs proposent une approche de formation d'équipes en tenant compte des domaines d'expertise des concepteurs (par exemple, mécanicien, électronicien, ...) et des caractéristiques techniques qu'ils doivent définir.
- Minimisation des efforts de coordination sur le projet [McCord et Eppinger, 1993 ; Morelli *et al.* 1995 ; Sosa *et al.* 2003]. Ces travaux cherchent à améliorer les flux d'informations et la communication entre concepteurs et utilisent des DSM-acteurs pour regrouper, au sein d'une même équipe, les acteurs fortement interdépendants et minimiser les efforts de coordination entre équipes.
- Constitution d'une équipe [Chen S.J. et Lin, 2004 ; Hadj-Hamou et Caillaud, 2004 ; Gronau *et al.*, 2007] ou allocation de ressources humaines [Canos et Liern, 2004 ; Eiselt, 2008]. Ce thème de recherche est abordé de deux façons complémentaires : répartir un ensemble de tâches à différentes équipes de conception ou allouer des ressources humaines aux tâches de conception, en fonction de leurs compétences.
- Couplage entre les architectures du produit et de l'organisation: [Gulati et Eppinger, 1996 ; Eppinger et Salminen, 2001 ; Oosterman, 2001 ; Sosa *et al.*, 2004 ; Browning, 1999, 2001 ; Yassine et Wissman, 2007]. Ces travaux formulent des recommandations sur la façon

---

<sup>60</sup> Notons que terme anglo-saxon "*organization*" correspond à l'architecture organique.

d'organiser un projet en tenant compte des interactions entre les modules du produit et des barrières organisationnelles (cloisonnement) qui limitent parfois la communication entre les concepteurs. Certains se placent sur un aspect stratégique de la modularisation quand il s'agit de décider de sous-traiter la conception et réalisation d'un module [Sanchez et Mahomey, 1996]. [Sosa *et al.* 2004] proposent un outil de diagnostic de l'organisation basé sur la comparaison des interactions réelles entre acteurs avec les interactions attendues en anticipant les choix d'architecture sur le produit. Les premiers travaux s'intéressant à formaliser le couplage sous forme de matrice d'incidence sont récents [Danilovic et Browning 2007 ; Sosa *et al.* 2007b ; Lindemann 2007] mais n'ont pas encore abouti à une méthode d'optimisation de ce couplage.

### 6.4.2. Synthèse

Les deux premiers types de thématiques sortent du cadre de notre travail. L'optimisation des processus ayant été déjà bien traitée, nous n'avons pas choisi cette voie de recherche. La quatrième thématique va être détaillée dans la section suivante.

Nous présenterons, dans le chapitre 8, des résultats récents sur le couplage entre l'architecture du produit et celle de l'organisation. Nous proposerons alors une méthode d'optimisation permettant de minimiser les efforts de coordination en tenant compte des choix d'architecture du produit.

## 6.5. *Sur la constitution d'équipes*

La constitution d'équipes est une activité importante dans le pilotage d'un projet de conception et a reçu une attention soutenue de la part de chercheurs répartis dans différentes communautés ou disciplines scientifiques : Sciences et Techniques de la Production (apports sur la prise en compte de la performance technique), sciences humaines (apports sur la prise en compte de facteurs psycho-sociologiques dans la réussite d'une équipe) ou sciences du management (souvent, avec une approche de gestion des ressources humaines).

Nous présentons ci-dessous une typologie des équipes de conception puis une synthèse bibliographique sur des modèles et méthodes d'optimisation de la constitution des équipes.

### 6.5.1. Typologie d'équipes de conception

Par analogie avec l'architecture du produit, Sosa *et al.* [2003] appellent "équipe modulaire" (resp. "équipe intégrative"), une équipe qui a la responsabilité de concevoir un système modulaire (resp. un système intégrateur) (Figure 34). Cette définition repose implicitement sur l'hypothèse que l'organisation la plus efficace est celle qui réalise une correspondance directe entre système / sous-systèmes et équipes. Yassine et Braha [2003] appellent ces équipes respectivement "équipe locale de conception"<sup>61</sup> et "équipe système".

Pour être plus général, nous retenons comme définition :

- une équipe modulaire est un ensemble de concepteurs qui échangent fréquemment des informations entre eux (forte interdépendance de leurs activités) et qui ont peu d'échanges avec l'extérieur ;
- une équipe intégrative est un ensemble de concepteurs qui joue un rôle d'architecte - intégrateur, et qui a besoin d'échanger fréquemment des informations avec d'autres concepteurs ou équipes modulaires ;

---

<sup>61</sup> Les termes originaux sont "modular team", "integrative team", "local development team" et "system team"

- une communauté d'interface (ou "engineering liaison" [Mc Cord et Eppinger, 1993]) est un sous-groupe d'acteur, qui n'est pas forcément institutionnalisé, dont le rôle est de faciliter la collaboration entre deux équipes, pouvant appartenir à des entreprises différentes, et de gérer les interfaces entre ces deux équipes. Généralement, ces besoins d'interaction proviennent d'un chevauchement de modules dans le produit lié à un (ou plusieurs) composant(s) pouvant appartenir à plus d'un module [Pimmler et Eppinger, 1994].

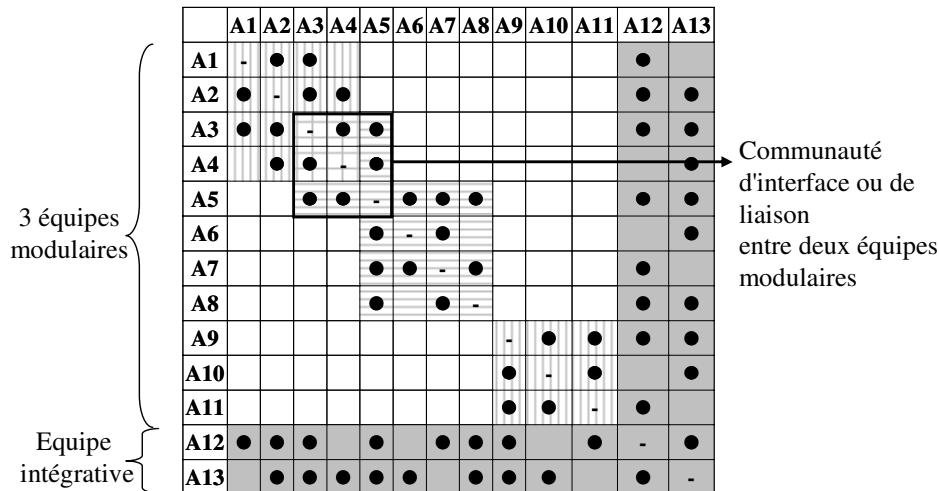


Figure 34 : Représentation d'une organisation en équipes

### 6.5.2. Etat de l'art

De Korvin *et al.* [2002] ont développé un modèle de sélection du personnel pour les projets multi-phases. Ce modèle prend en compte trois facteurs : les compétences nécessaires pour chaque phase du projet, la contrainte de précédence, le salaire du personnel. Une mesure de compatibilité basée sur la logique floue a été adoptée pour choisir le membre qui possède la valeur maximale de similarité, afin de proposer des membres d'équipe potentiels pour chaque phase du projet.

Dans le domaine de la conception de logiciels, Gronau *et al.* [2007] ont proposé une méthode de formation d'équipe basée sur une taxonomie (réseau sémantique et base de connaissances), ainsi que sur la modélisation des processus et des connaissances. Tsai *et al.* [2003] ont implémenté le diagramme de ressources critiques (Critical Resource Diagram, CRD) et la méthode Taguchi, pour sélectionner les membres les plus appropriés pour un projet de conception. La disponibilité des membres et les coûts des employés ont été pris en compte. D'autres approches mathématiques ont été proposées pour l'aide à la constitution d'équipes dans des projets de développement de logiciels [Acuna et Juristo, 2004].

Eiselt et Marianov [2008] ont proposé un modèle pour l'affectation de tâches aux employés. Ils s'intéressent à résoudre un problème avec plusieurs objectifs et avec des contraintes posées par les compétences des employés. Les employés (resp. les missions) sont modélisés par le niveau acquis (resp. requis) pour différentes compétences élémentaires. Des coûts liés à des heures supplémentaires ou à de la sous-traitance sont pris en compte dans le modèle. Les objectifs sont de minimiser l'inégalité des charges, minimiser la distance entre l'employé et la tâche pour éviter l'ennui de l'employé et enfin, minimiser les heures supplémentaires et le coût de sous-traitance.

Certains travaux ont caractérisé les rôles, les personnalités ou les profils cognitifs en vue de la constitution d'équipes. Dans un contexte d'ingénierie concurrente, Chen S.J et Lin [2004] ont proposé un modèle mathématique basé sur trois caractéristiques : compétences techniques, capacité de travailler en équipe et profil de personnalité<sup>62</sup>. Dans [Hadj-Hamou et Caillaud, 2004],

<sup>62</sup> basé sur le MBTI-Myers-Briggs Type Indicator

les auteurs proposent une méthode de constitution d'équipes dans le contexte de la conception collaborative. Quatre facteurs ont été pris en compte : le domaine d'expertise, le rôle dans l'équipe, le niveau d'expertise et la capacité de coopération. Une méthode d'optimisation par programmation linéaire a été utilisée pour attribuer les acteurs nécessaires pour chaque domaine d'expertise (compétences techniques) et pour maximiser la diversité des rôles (compétences psycho-sociologiques) au sein de l'équipe du projet. Fitzpatrick et Askin, [2005] combinent une approche heuristique et une méthode mathématique pour l'aide à la formation des équipes de projet à partir d'un domaine de travail comportant un ensemble d'acteurs possédant des compétences différentes. Ils ont mis l'accent sur la performance des équipes par leurs comportements et qualités interpersonnelles<sup>63</sup>.

Certa *et al.*, [2006] ont développé un modèle d'optimisation pour l'allocation de ressources humaines polyvalentes (possédant de multiples compétences) sur des projets de conception. Un modèle de programmation linéaire multicritère est formulé visant à maximiser le niveau requis de compétence et à augmenter le niveau des compétences en fin de projet.

### 6.5.3. Synthèse

Le Tableau 23 présente une synthèse de l'état de l'art sur la constitution d'équipes, en mettant en évidence des critères communs ou distinctifs entre ces travaux.

Référence	Thème de recherche	Type de compétence		Approches de résolution	Projet (Mono/Multiple)	Critères			
		Compétence technique	Compétence socio-psychologique			Efficience	Charge	Coût	Dynamiques de compétence
[Hadj-Hamou and Caillaud, 04]	Développement de produit	Expertises, niveaux	Rôle ; capacité à collaborer	Programmation linéaire	Mono	X	--	--	--
[Chen and Lin, 04]	Développement de produit	Niveau département (domaine de compétence)	Capacité à collaborer ; profil de personnalité	Programmation linéaire	Mono	X	--	--	--
[Canos and Liern, 04]	Management des ressources humaines	--	--	Logique floue	Mono	X	--	--	--
[Certa et al., 06]	Affectation multi-projet	--	--	Programmation linéaire	Multiple	X	--	--	X
[De Korvin, et al. 02]	Projets multi-phases	Niveau activités	--	Logique floue, heuristique	Mono (multi phase)	X	x	x	--
[Fitzpatrick and Askin, 05]	Cellule manufacturière	Domaine d'expertise	KCI (Kolbe conative index)	Programmation linéaire, heuristique	Mono	X	--	--	--
[Gronau et al., 06]	Conception de logiciel	Concept de taxonomie	-	Distance d'ontologie	Mono	X	--	--	--
[Tsai et al., 03]	Conception de logiciel	Connaissance technique	--	CRD and Taguchi's parameter design	Mono	X	--	x	--
[Eiselt et Marianov, 08]	Affectation Satisfaction du travail	Attribut de compétences	Satisfaction au travail	Programmation linéaire	Mono	X	--	X	--

**Tableau 23 : Synthèse de l'état de l'art sur la constitution d'équipe**

<sup>63</sup> basée sur le KCI-Kolbe Conative Index

Nous retenons que plusieurs pistes de recherche peuvent être ainsi identifiées :

- Bien que les précédentes méthodes utilisent différentes expressions de la compétence et des ressources qui la composent, certaines de ces approches renseignent partiellement sur la composition interne de ces compétences pour faire émerger une compétence collective mais peu donnent des orientations sur la manière dont seront définis les composants de cette compétence. Ainsi, peu de contributions s'appuient sur une approche formelle pour caractériser les compétences.
- Peu de travaux considèrent la compétence comme une ressource dynamique et évolutive. C'est ici la principale différence entre une ressource matérielle qui se dégrade quand elle est utilisée et une compétence, une ressource à la fois cognitive et organisationnelle, qui se dégrade si elle n'est pas utilisée et se développe dans l'activité. Ainsi, peu de travaux prennent en compte des besoins de développement des compétences au cours de la réalisation d'un projet ;
- enfin, le couplage entre la structuration des tâches et la constitution des équipes (avec des acteurs provenant de différents métiers et caractérisés par leurs compétences) a été rarement réalisé.

Ces trois points feront l'objet de contribution.

## 6.6. *Sur le pilotage des systèmes de compétences*

Le pilotage des systèmes de compétences s'intéresse à tous les processus qui contribuent à l'acquisition, à la mise en œuvre et au développement de compétences spécifiques à une entreprise, produisant des biens ou des services.

Dans le domaine professionnel, le Mouvement des Entreprises de France [MEDEF 2002] a entrepris depuis quelques années une action de sensibilisation et d'accompagnement auprès des industriels afin de les inciter à repenser leurs modes de gestion des ressources humaines et à mettre en place une nouvelle démarche basée sur les compétences. Le but est l'amélioration des performances de l'entreprise et (ou par) la reconnaissance des compétences des salariés. Les normes qualité ISO 9000 Version 2000 demandent aux entreprises de pouvoir justifier qu'elles disposent des ressources compétentes, qualitativement et quantitativement, en fournissant les preuves que les employés ont bien développé les compétences requises par les différents processus.

### 6.6.1. **Etat de l'art**

Pour répondre aux problématiques industrielles, plusieurs axes de pilotage des systèmes de compétences sont traités dans la littérature. L'Annexe 5 contient un article présentant un état de l'art que nous avons co-rédigé [R.5]. Il est intitulé "Formalisation and use of competencies for industrial performance optimisation: a survey". Dans cette section, nous n'entrerons donc pas dans le détail des publications sur ce thème puisque le lecteur pourra se reporter, s'il le souhaite, à cet article.

En France, les premiers travaux de recherche, inscrits dans le domaine des Sciences et Techniques de la Production, concernent surtout l'intégration du concept de compétence dans la modélisation d'entreprise et dans but d'améliorer le pilotage des systèmes de production : [Boucher *et al.*, 1999, 2003, 2006, 2007 ; Harzallah *et al.*, 2000, 2006 ; Jia 1998 ; Hermosillo *et al.* 2002, 2003, 2005 ; Houé *et al.*, 2006 ; Rose *et al.*, 2006 ; Bennour et Crestani, 2007].

Concernant les axes les plus intéressants pour notre positionnement, nous retenons les travaux suivants :

- Identification des compétences disponibles. Ce thème a été bien couvert, en particulier par des travaux de type managérial s'intéressant aux compétences stratégiques, susceptibles de favoriser l'avantage concurrentiel de cette organisation [Prahalad *et al.* 1990 ; Spencer 1993 ; Meyer et Utterback, 1993 ; Sanchez *et al.* 1996] ou par des travaux visant à fournir un support informatique pour le pilotage des compétences [Lucia *et al.* 1999 ; Stenlund et Hörte 1999 ; Walsh et Linton 2002 ; Ley et Albert, 2003 , Pépiot 2005 ; Berio et Harzallah 2005 ; Jussupova et Probst, 2007].
- Planification et compétences. Ce thème est intéressant pour nos travaux puisqu'il se situe en aval de la constitution des équipes. Les principaux résultats concernent la planification des activités de production [Cai et Li 2000 ; Nembhard 2001, *et al.* 2002 ; Mosheiov 2001 ; Arditi et Tokdemir 2001 ; Ernst *et al.* 2004]. Citons en France les travaux de [Grabot et Letouzy 2000 ; Franchini *et al.* 2001].
- Evaluation des compétences et intégration de ce concept dans la mesure de la performance globale de l'organisation. Cet axe s'intéresse à évaluer le rôle de la ressource humaine et l'impact des pratiques managériales de pilotage des compétences sur l'amélioration de la performance globale [Bennour 2007 ; Jussupova et Probst, 2007].
- Constitution des équipes. Cet axe a été présenté dans la section précédente.
- Développement des compétences. Ce thème s'intéresse au mode de transfert des compétences et aux conditions d'émergence d'une compétence collective. Il concerne des approches socio-cognitives [Vergnaud, 1998 ; Oget et Sonntag, 2001 ; Vaudelin et Devise, 2004].

Un exemple de système informatique d'aide à la gestion des compétences dans les projets de conception est l'application PEGASE développée par [Rose *et al.*, 2006] dans le cadre du projet IPPOP, [IPPOP 2001]. Le système est basé sur une matrice de compétences qui est une représentation des liens entre les composants du produit et les métiers concernés. Les compétences sont représentées en termes de connaissances, activités, autonomie et qualité, évaluées chacune sur quatre niveaux de maîtrise. Quatre types de compétences sont définis dans le système : techniques, organisationnelles, relationnelles et "sociales et d'adaptation". Les fonctions assurées par le système sont l'enregistrement des données sur les compétences disponibles chez les acteurs et celles requises par les phases du projet. Il comporte un moteur de recherche afin d'aider le manager dans la tâche d'affectation des ressources et pour contrôler la participation de chaque acteur dans les activités du projet.

### 6.6.2. Synthèse

Les axes précédents de pilotage d'un système de compétences reposent tous sur une étape préliminaire de caractérisation de la compétence à travers des composants évaluables par des mesures quantitatives ou qualitatives indiquant le niveau de maîtrise de ces composants. L'étape de caractérisation est réalisée aussi bien pour l'identification des compétences disponibles, pour la constitution d'équipes, ou lors de la définition des actions de développement de compétences, afin d'identifier les aspects à faire évoluer chez les acteurs pour atteindre un niveau souhaité de maîtrise d'une compétence. Cette étape repose sur une approche empirique d'estimation par un expert, ce qui lui confère un caractère très subjectif. Nous présenterons une contribution à la caractérisation des compétences, qui a été réalisée dans le cadre de la thèse de F. Belkadi.

Plus globalement, il ressort de cet état de l'art et de l'article [R.5] que les différents niveaux de pilotage des systèmes de compétences ne sont pas souvent étudiés simultanément, essentiellement en raison de leur proximité avec des communautés scientifiques différentes. Le niveau opérationnel repose fortement sur des approches de psychologie ou ergonomie cognitive. Le

niveau organisationnel intéresse, entre autres, les communautés de la sociologie (pour l'étude des régulations entre et dans les collectifs, Etc.) ou de la modélisation d'entreprise (pour la modélisation des processus). Le niveau stratégique intéresse la communauté du management ou du marketing stratégique (pour l'analyse des avantages concurrentiels, Etc.). En conséquence, les modèles et méthodes existantes ne proposent pas d'articulation appropriée entre ces trois niveaux de pilotage.

Les concepts d'activité, d'organisation et de pilotage tenant une place centrale dans nos travaux, que ce soit sur le système de conception ou sur le système de compétences, nous proposons dans la section suivante une synthèse sur l'analyse des activités de conception, de leur organisation et de leur pilotage.

## 6.7. Analyse des activités de conception et de leur pilotage

Une instrumentation adéquate de l'activité d'architecte suppose au préalable une analyse fine de ses activités, qu'elles soient individuelles ou tournées vers un collectif. Nous avons eu besoin de mieux comprendre la nature et les caractéristiques des activités de conception ainsi que leur organisation et plus globalement, leur pilotage.

### 6.7.1. Nature de l'activité

Pour identifier la nature de l'activité, nous nous sommes appuyés sur des travaux en psychologie cognitive concernant la théorie des schèmes ou sur des travaux en ergonomie cognitive. Nous présentons ci-dessous les caractéristiques générales des activités professionnelles qui nous intéressent.

Il y a activité dès qu'un acteur, individuel ou collectif, pour résoudre un problème (dans le cas d'une activité professionnelle, pour apporter un service, assurer une mission), manifeste une conduite productive, finalisée, située, organisée, proactive, instrumentée et constructive.

L'activité est productive par le fait qu'un acteur central produit des résultats intermédiaires et finaux, observables par un modélisateur. Ces résultats correspondent à des traces de son activité mentale qui peut ainsi être partiellement déduite. **Modéliser une activité nécessite d'abord de bien définir l'acteur étudié** et considéré alors comme un système<sup>64</sup>.

L'activité est finalisée. La production de résultats est liée à une finalité, à un objectif, à une motivation. Elle est à la fois intentionnelle et projective [Searle, 1998]. Dans le cas de l'activité professionnelle, il s'agit d'une contribution à l'apport d'un service à un destinataire, formalisée sous forme de mission ou prestation à réaliser.

L'activité est située [Theureau, 2006]. Il n'est pas possible, pour la comprendre ou la modéliser, de dissocier l'acteur central de son environnement externe. Celui-ci comprend des tiers, des objets ou des ressources visés par ses actions, interactions ou transactions.

L'activité est organisée. Elle est sous-tendue par un schème qui fournit une "organisation invariante de la conduite de l'activité" [Vergnaud, 1998]. C'est l'organisation qui est globalement invariante et non la conduite qui réalise des ajustements aux événements réels de la situation. Analysée par un modélisateur, l'activité est composée d'un ensemble d'actions hétérogènes (opérations, échange d'informations, transactions, ...) et séquencées. Elle peut être modélisée par un plan d'actions.

---

<sup>64</sup> Cette approche système est utile pour enrichir la représentation de l'activité. Elle peut toutefois choquée des chercheurs en psychologie cognitive qui considère que seul un sujet qui pense peut mener une activité. Notre hypothèse est qu'en considérant l'activité collective comme une organisation pour l'action, avec des processus et des mécanismes de coordination partagés par un ensemble d'individus, nous disposons de concepts et de méthodes de modélisation identiques, au niveau de l'individu comme au niveau des collectifs dans lesquels il collabore.



L'activité est proactive. Certaines actions réalisées dans le cours de l'activité sont dites proactives, au sens où elles ont pour effet de structurer des composants de la situation dans laquelle l'activité se déroule. Parmi elles, figurent les actions d'organisation, c'est-à-dire de structuration et d'instrumentation de l'activité collective.

L'activité est instrumentée. Si l'activité ne peut être réalisée sans outil, prévaut alors une "situation d'activité instrumentée" [Rabardel et Pastré, 2005]. L'activité sert à l'ergonome cognitif pour orienter son projet d'instrumentation [Darses et Falzon, 1996 ; Theureau, 2006]. Elle l'aide à cerner quoi observer et à délimiter le périmètre fonctionnel des outils qu'il conviendrait de créer ou de perfectionner, pour en améliorer l'utilisation.

L'activité lie une dimension cognitive (savoir et croire), une dimension constructive (apprendre) et une dimension productive ou opératoire (produire, utiliser et interagir) [Vergnaud 1998]. De la sorte, formaliser l'activité suppose de prendre en compte non seulement des modalités épistémiques (croire, savoir), mais aussi déontiques (devoir, pouvoir), pratiques (produire, utiliser) ou transactionnelles (imposer, négocier). Enfin, c'est dans et par l'activité que se développent de nouvelles connaissances et compétences. Le fait de la réaliser permet à l'acteur de construire et de disposer d'une "expérience" [Theureau, 2006] à partir de laquelle il peut donner sens à des structures mentales, explorer des activités connexes et enrichir, en retour, les structures mentales initiales.

Ces différentes caractéristiques d'une activité professionnelle sont particulièrement marquées en conception, ce qui explique la complexité de son analyse.

### 6.7.2. Modèles de l'activité

Nous n'entrerons pas en détail dans un état de l'art sur la modélisation de l'activité en général qui serait forcément incomplet car c'est un domaine très largement étudié dans la littérature.

Notons, dans le domaine de la modélisation d'entreprise :

- les travaux publiés dans le cadre de CIM-OSA<sup>65</sup>, de GERAM<sup>66</sup> ou en France, par F. Vernadat [1999], A. Cauvin [2005], H. Paneto [2006], V. Chapurlat [2007], X. Boucher [2007].
- les travaux récents de l'OMG sur "Business Process Modeling Notation Specification", adopté en février 2006, qui présente un cadre de référence pour la modélisation des processus et des activités.

En ce qui concerne la modélisation des activités de conception, plusieurs thèses ont été soutenues en France sur la modélisation complémentaire du produit et du processus de conception, dont le but était de formaliser les connaissances issues des activités de conception. Citons notamment : [Harani, 1997 ; Ouazzani, 1999 ; Menand, 2002]. Des méthodes de capitalisation des connaissances s'appuyant sur une modélisation de l'activité ont été proposées. Nous avons réalisé un état de l'art sur la modélisation de l'activité de conception à des fins de constitution de mémoire de projet, dans la thèse de F. Belkadi [Th.2].

### 6.7.3. Caractéristiques et dialogues de l'activité de conception

Dans son activité, le concepteur est amené à manipuler un nombre important de dialogues. Une dialogue unit deux principes ou notions antagonistes, qui apparemment devraient se repousser l'un l'autre, mais qui sont indissociables et indispensables pour comprendre une même réalité et rendre intelligible un système complexe. Un exemple bien connu concerne les particules de lumière. Le

---

<sup>65</sup> AMICE, "CIMOSA : Open Architecture for CIM". Berlin, Springer Verlag, 1993.

<sup>66</sup> GERAM: Generalised Enterprise Reference Architecture and Methodology. Version 1.6.1, IFIP-IFAC Task Force on Architectures for Enterprise Integration, Mars 1999.

physicien Niels Bohr a reconnu la nécessité de les penser à la fois comme corpuscules et comme ondes.

Nous donnons dans le Tableau 24 des dialogies que nous avons identifiées dans les activités de conception et de pilotage. Repérer ces dialogies lors de l'analyse de l'activité permet de mieux comprendre la structuration du plan d'actions construit par un acteur.

Exemples de dialogies de l'activité de conception	Exemples de dialogies de l'activité de pilotage de la conception
génération d'hypothèses / estimation	prescrit / émergent
créativité / contrainte	stratégique / opérationnel
projectif / rétrospectif	réactif / pérenne (vision bifocale)
coût / valeur	coévolution / réflexivité
fonctionnel / organique	acquis / construit
générique / particulier (famille / unique)	réplication / ajustement
séquentiel / itératif	allonomie / autonomie
globale / locale	base / distinctif
incertitude / connaissance	individuel / collectif

**Tableau 24 : Exemples de dialogies**

#### 6.7.4. Différentes vues de l'organisation du projet

En ingénierie système, la première instanciation d'un système concerne le produit. Une seconde instanciation concerne le système projet.

Les tâches de développement peuvent être déterminées à partir d'une combinaison entre les processus génériques de développement<sup>67</sup> et les constituants de l' "arborescence technique du produit" à réaliser (organigramme du produit, ou PBS, Product Breakdown Structure). Le résultat de cette combinaison est représenté sous forme d'une arborescence ou d'une succession de tâches et est appelé "organigramme des tâches"(ou WBS, Work Breakdown Structure). Cette arborescence est ensuite utilisée pour décrire le projet comme un réseau de processus enchaînant des tâches. Cette description correspond à une vue fonctionnelle de l'organisation du projet : c'est l'architecture fonctionnelle du système projet. Les processus (de fonctionnement du système projet) doivent être coordonnés en fonction des dépendances entre tâches, de leurs conditions de fin et en vue de respecter les objectifs de réalisation.

Une autre vue dite physique [Meinadier 2002] considère les entités de l'organisation et leurs interfaces. L'architecture physique (ou organique) consiste alors à allouer des tâches et des ressources à des entités organisationnelles, ou équipes, (analogie avec la projection des fonctions sur les constituants du produit) qui auront alors la responsabilité de l'accomplissement de ces tâches. Nous utiliserons le terme "acteur" pour désigner soit une entité organisationnelle ou une équipe (acteur collectif), soit un concepteur (acteur individuel).

Notons que l'architecture fonctionnelle doit avoir une certaine robustesse, en cas d'évolution d'une tâche ou d'un acteur au cours du projet, ainsi que d'un projet à un autre ("invariance" relative à un certain niveau d'abstraction). Par ailleurs, l'allocation des tâches à des acteurs peut

<sup>67</sup> Ceux-ci sont déterminés en respectant une norme relative à l'Ingénierie Système (ISO 15288, IEEE 1220, ...).

être contrainte par des aspects non techniques mais économiques, politiques ou juridiques, comme par exemple, l'existence de Métiers ou d'entités juridiques, des décisions d'outsourcing.

### 6.7.5. Niveaux de pilotage du projet d'IS

Meinadier [2002] soutient que : "la planification d'un projet consiste à rendre cohérentes entre elles trois logiques, dans le respect des objectifs et contraintes du projet :

- la logique du produit à réaliser (arborescence des produits),
- la logique temporelle des processus (enchaînement des activités),
- la logique de la structure organisationnelle du projet."

Ces trois logiques correspondent à ce que Eppinger et Salminen [2001] appellent les domaines du projet : le produit, le processus et la structure organisationnelle<sup>68</sup>.

Dans un chapitre de livre [Ch1], nous avons approfondi cette vision en distinguant trois niveaux importants dans le pilotage d'un projet :

- Pilotage stratégique. Il consiste à décomposer le projet en phases qui constituent son cycle de vie. Le passage d'une phase à la suivante donne lieu à une revue de projet planifiée où des décisions critiques sont prises : décisions d'engagement, de poursuite avec maintien des objectifs ou avec révision des moyens, d'itération pour amélioration de la solution ou pour révision des objectifs, ou décision d'arrêt. Durant ces revues, le chef de projet rend compte au comité de pilotage de l'avancement du projet en termes d'objectifs et de moyens mis en œuvre.

- Pilotage organisationnel (ou définition de l'architecture du système projet). Il consiste à analyser les besoins et à spécifier les objectifs et missions du système projet (études d'opportunité), puis à définir le processus de conception comme un enchaînement de tâches à réaliser (architecture fonctionnelle du projet) pour atteindre ces objectifs et enfin à affecter un acteur à la réalisation de chaque tâche afin d'obtenir un enchaînement des flux d'informations entre acteurs (architecture organique du projet). Les termes pour désigner ces activités varient fortement selon les auteurs. Nous parlerons de pilotage organisationnel du projet. Quand le projet est lancé, ces activités de structuration peuvent être itérées périodiquement pour adapter l'organisation du projet, en fonction des écarts observés ou de nouvelles connaissances acquises en cours de projet. En effet, on ne peut espérer une organisation détaillée des tâches et des ressources, définie une fois pour toute et stable tout au long du projet. Le projet n'a pas un caractère déterministe mais fortement incertain (problème incomplètement défini au départ, constante évolution de l'environnement ...). Les architectes systèmes et chefs de projets n'acquièrent donc que progressivement les connaissances sur le projet qui leur permettent de l'organiser en détail.

- Pilotage opérationnel (ou conduite de projet). Il consiste à gérer les activités dans le plan du projet, à les ordonnancer, à maîtriser au mieux les dérives et modifications dues aux aléas, de manière à respecter les objectifs du projet et à garantir la cohérence de la maturité à l'intérieur d'une strate ainsi que la progression entre les strates. En effet, la mise en œuvre de rangs d'exigences entraîne qu'il n'est pas nécessaire d'attendre la fin de la conception dans une strate pour enclencher la conception dans la strate aval. La gestion de l'information et de la configuration est ainsi une activité importante pour le bon déroulement du projet. Les activités de pilotage opérationnel permettent d'intégrer progressivement les différentes contributions des acteurs du projet et de fournir les informations nécessaires à la validation de ces résultats, lors des points d'avancement internes à l'équipe projet ou des revues de projet.

Certains auteurs adoptent une structuration semblable du système de pilotage [Génelot, 1992], en particulier pour la conception et le pilotage de systèmes de conception [Girard et Doumeings, 2004].

---

<sup>68</sup> Le terme anglo-saxon utilisé est "organization".

## 6.8. Synthèse

L'analyse de l'activité d'un architecte système nécessite de recourir à différents fondements scientifiques ou méthodologiques, comme l'approche système, l'analyse de l'activité (en partie, issue des travaux d'ergonomie cognitive), les concepts de l'ingénierie système et du pilotage de systèmes de conception.

Ce chapitre a fourni un état de l'art de l'architecture des organisations d'un projet avec des synthèses bibliographiques partielles (sections 6.4.2, 6.5.3, 6.6.2) dégageant des pistes de recherche nouvelles.

Globalement, il ressort que, pour améliorer ses performances, le pilotage du système de conception nécessite aujourd'hui une meilleure intégration des systèmes de compétences dans les décisions : de structuration des métiers, de constitution d'équipes dans un projet ou de création de chaîne de valeur (niveau stratégique, entreprise étendue).

Cette problématique est au cœur des contributions qui seront présentées dans le chapitre suivant. Ces contributions restent dans le cadre des Sciences et Techniques de la Production et de l'ingénierie système, puisque notre but est de **fournir des modèles et méthodes formelles d'aide à la décision, utiles à l'architecte système, pour définir l'architecture du système de conception, en tenant compte des compétences des acteurs.**

Cependant, étant donné le caractère pluridisciplinaire de cette recherche, nous avons mené des collaborations avec des chercheurs en Sciences Humaines et Sociales, dans le cadre du projet de recherche avec PSA Peugeot Citroën et du groupe de travail sur les connaissances et compétences. Nous avons aussi pu travailler avec des chargés de mission de l'ANACT sur Besançon qui développe une approche stratégique, socio-professionnelle et ergonomique dans le cadre de la mise en place de "démarche compétence" en PME-PMI.

## Chapitre 7. Contribution à l'organisation du système de conception

### 7.1. Introduction

L'état de l'art sur l'organisation d'un projet de conception a montré que plusieurs voies de recherche sont peu explorées. La Figure 35 présente la structure générale de ce chapitre en situant les différentes contributions sur les niveaux décisionnels de pilotage d'un système de conception, afin de montrer notre volonté de trouver une articulation cohérente entre ces niveaux, tout en restant centré sur l'organisation du système de conception (niveau organisationnel). Nous présentons ainsi cinq contributions complémentaires :

- Un cadre conceptuel pour le pilotage sociotechnique du système de conception en Ingénierie Système.
- Une méthode de caractérisation d'une compétence en conception.
- Une méthode de constitution d'équipes compétentes.
- Une méthode de structuration de filières métiers, basée sur une extension des matrices DSM pour modéliser des interactions basées sur des connaissances ou des compétences.
- Un outil de qualification et de déploiement d'une compétence stratégique en conception.

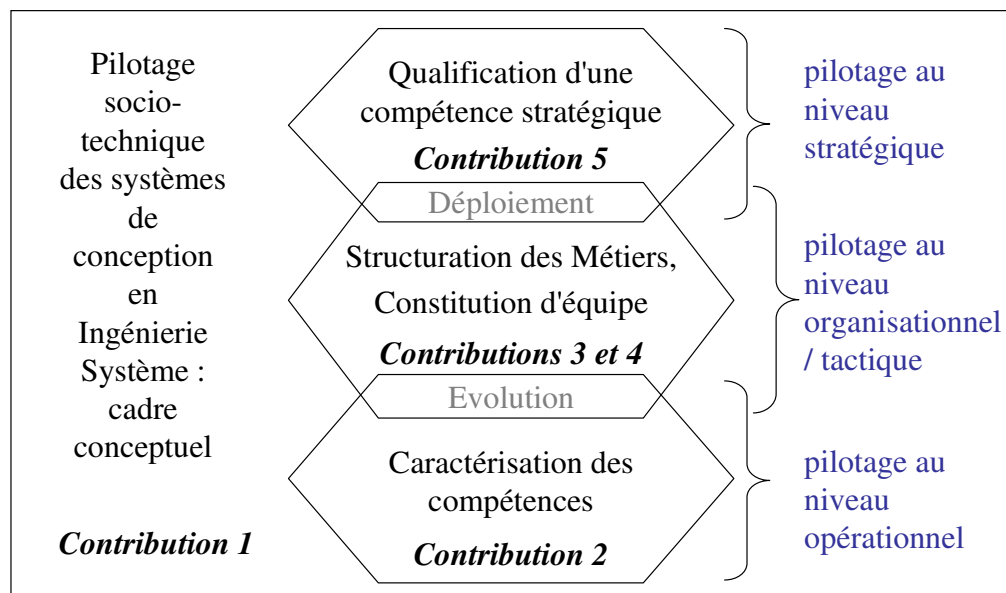


Figure 35 : Structure générale des contributions

## 7.2. Contribution au pilotage du système de conception en IS<sup>69</sup>

L'IS s'intéresse simultanément à la structuration du système-produit, à la structuration du système-projet de conception et à son pilotage. Toutefois, aujourd'hui, la dimension relative aux systèmes-acteurs et à leurs compétences n'est pas suffisamment mise en évidence. Nous étudions le pilotage des activités de conception selon deux points de vue : sa structuration, et la modélisation et l'intégration des systèmes de compétences sur les trois niveaux de pilotage traditionnel.

### 7.2.1. Structuration du pilotage des activités de conception en IS

Nous postulons ainsi que l'amélioration de la performance globale passe par un pilotage des activités de conception, intégrant les trois axes (voir Figure 36) : le produit comme élément de la stratégie et résultat de l'activité de conception (objectifs exprimés en termes de valeur, de prestations clients et de coût global), les projets de conception (ensemble d'activités et de ressources qui génèrent de la valeur et consomment des coûts) et les acteurs (regroupés en Métiers ou par type de compétences, qui sont mobilisées, renforcées ou renouvelées dans les projets de conception ainsi que dans d'autres projets dont l'une des finalités est le développement de compétences, pour les rendre disponibles pour de futurs projets).

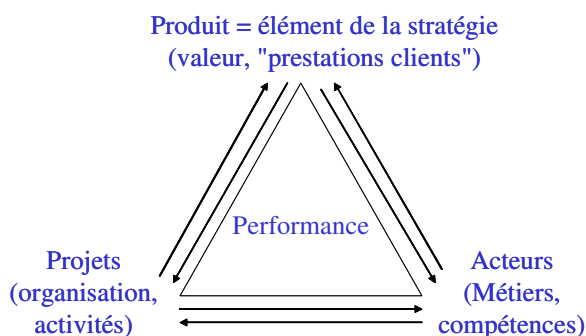


Figure 36 : Logique ternaire de la performance

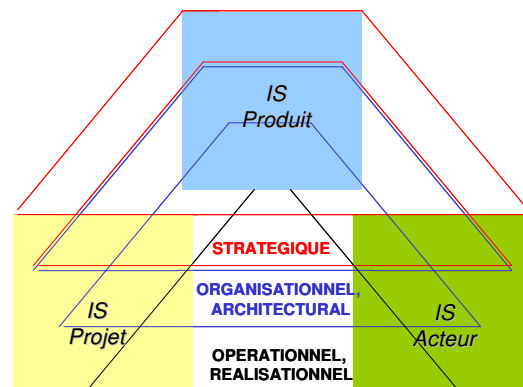


Figure 37 : Modélisation selon l'IS

Dans un chapitre de livre [Ch.1], nous avons proposé un cadre global de pilotage des activités de conception en IS en montrant comment la conception de ces 3 systèmes fortement inter-reliés peut être structurée de façon analogue en utilisant les concepts de l'IS (Figure 37). Notre approche, à la fois récursive (décomposition de systèmes en sous-systèmes sur différentes strates) et structurée sur 3 niveaux (stratégique, organisationnel, opérationnel), peut être appliquée, de façon semblable, à la conception ou à l'adaptation des systèmes : le produit, le projet, les acteurs (et leurs compétences).

Les applications habituelles de l'IS correspondent à la conception du système-produit, voire à celle du système-projet. Nous avons étendu l'utilisation des principes de l'IS au système-acteur et au système de pilotage. Ainsi, nous avons présenté une structuration du pilotage des activités de conception par l'IS, articulant une vision des trois principaux systèmes en jeu au cours des activités de conception : le système-produit, le système-projet et le système-acteur. Cette structuration

<sup>69</sup> Cette section est une synthèse d'un chapitre de livre [Ch.1], qui a proposé une conceptualisation de l'organisation du système de conception de DPMO et de son évolution, au cours de nos six années de collaboration (transformation de DOGN en DPMO, restructuration des métiers, fusion de certains pôles de compétences ...). Elle a été le fruit de nombreux entretiens avec le Directeur de cette entité et d'autres Directeurs Métiers.

permet de mieux appréhender les différentes dimensions du pilotage et de positionner l'entreprise dans une dynamique d'amélioration de sa performance.

Ce travail a été réalisé à partir d'une conceptualisation du pilotage de DPMO, qui peut être qualifié de systèmes complexes de conception. Il est évident qu'un tel cadre n'est pas adapté à la description d'un service de conception de quelques dizaines de personnes.

### 7.2.2. Pilotage global des systèmes de compétences en conception

Comme nous l'avons déjà mentionné, nous avons mené un projet de recherche intitulé "Activités et compétences de conception" avec PSA Peugeot Citroën qui s'est étendu sur six années. Ce projet nous a permis de collecter des informations et d'acquérir des connaissances sur la conception de systèmes complexes, des organisations de projets et métiers de la conception (DPMO : plus de 4400 personnes) et sur le pilotage des telles organisations (nombreux entretiens avec des Directeurs des métiers de la conception et avec des directeurs, pilotes ou chefs de projets).

Dans cette partie, nous présentons succinctement les résultats principaux de ce projet de recherche et nous indiquons les communications qui présentent les modèles proposés.

#### 7.2.2.a. Evolution du questionnement sur quatre phases de recherche

Dès son origine en 1999, nous avons structuré le projet de recherche avec PSA Peugeot Citroën en quatre phases devant se succéder après validation de la phase précédente. Ce projet s'est ainsi inscrit sur le long terme, avec une période de redéfinition des objectifs et de rédaction de cahier des charges de la recherche, entre deux phases.

Le questionnement soulevé par le Directeur<sup>70</sup> de la conception des Organes GMP et LAS a ainsi évolué, en intégrant à chaque phase un niveau supplémentaire du pilotage des compétences (opérationnel, puis organisationnel, enfin stratégique). Le Tableau 25 présente une synthèse du questionnement.

Phase	Niveau de pilotage	Questionnement
Phase de cadrage	-	Compréhension du besoin, définition d'un plan d'action de la recherche
Phase pilote	Niveau opérationnel	Caractérisation et mobilisation des compétences individuelles et collectives en conception, processus de développement des compétences
Phase de développement	Niveau organisationnel	Modélisation des compétences collectives, processus et conditions d'auto-organisation en conception ; spécification d'un dispositif de pilotage
Phase d'extensions	Niveau stratégique	Spécification d'un Management Stratégique Fondé sur la Compétence de conception Elaboration de critères permettant de qualifier une compétence stratégique en conception

**Tableau 25 : Une évolution du questionnement sur les quatre phases du projet**

Chaque phase ayant des objectifs pluridisciplinaires, nous avons collaboré avec des chercheurs d'autres disciplines en fonction des besoins du projet. Au cours de la phase pilote, la modélisation du concept de compétence et de son développement a nécessité le recours à des théories cognitives et donc à une collaboration avec des chercheurs en Sciences cognitives. Au cours des phases suivantes, le questionnement s'est déplacé sur l'organisation des acteurs collectifs et sur le

<sup>70</sup> Le comité de pilotage du projet était constitué de N. Lartigue, Directeur de DPMO (N-2 dans la hiérarchie de PSA), de son collaborateur, Directeur du service PRCB (Performances, Ressources, Compétences, Budget) et de leur collaboratrice, chargée du déploiement de la démarche compétence au sein de DPMO. En termes de méthode d'accès au terrain, chaque début de phase donnait lieu à des entretiens avec les directeurs de métiers (N-3, puis N-4) concernés par notre périmètre d'étude au sein de DPMO. Cette démarche était nécessaire pour que les ingénieurs identifiés soient informés de notre besoin d'entretiens, observations ou collaborations. Une restitution de fin de phase était aussi assurée à chaque niveau hiérarchique.

management stratégique des compétences de ces acteurs. Nous avons donc mené une collaboration avec des chercheurs en Sciences de gestion et Sciences Economiques.

### 7.2.2.b. Modèle systémique et cognitif de la compétence

Notre hypothèse de base est que la compétence est un système. Elle n'existe que parce qu'une personne (comme un modélisateur) a une intention de compréhension, d'action ou d'évaluation, sur ce qu'il appelle une compétence. Dans le contexte professionnel, la finalité d'une compétence est de permettre à l'acteur qui la possède de réussir une mission qui lui a été confiée. La réalisation de la mission peut être décomposée en un agencement de sous-buts intermédiaires (ou plan d'actions) que l'on peut considérer comme l'architecture fonctionnelle du système-compétence. Pour des missions semblables, cet agencement est généralement stable et renvoie au concept de schème.

Dans nos travaux, nous avons défini les concepts de **compétence**<sup>71</sup> et de **schème** ainsi : "La compétence est la mobilisation d'un ensemble de savoirs hétérogènes aboutissant à la production d'une performance reconnue, par rapport à un environnement donné et dans le cadre d'une activité finalisée."

"Un schème est une entité qui intègre en une structure, spécifique à la finalité et au contexte de l'action, des composantes cognitives hétérogènes". Modéliser un schème<sup>72</sup> revient à définir l'architecture organique d'une compétence : ensemble de connaissances, savoir-faire et règles de conduite structurés par un plan d'actions<sup>73</sup>.

Nous avons proposé un modèle d'activation d'une compétence qui repose d'une part sur une approche système et d'autre part, sur la théorie des schèmes. Ce modèle a été présenté dans différentes conférences [CI. 1, 7, 9, 11] et est au cœur du chapitre de livre sur le développement des compétences que nous avons rédigé [Ch3].

### 7.2.2.c. Le développement des compétences

Le schème n'est pas un concept cognitif statique. Il se construit, se modifie au cours du temps. Les processus de développement des compétences correspondent à un renouvellement par innovations majeures ou un renforcement par améliorations successives. Ces évolutions des compétences sont motivées par un gain en pertinence ou en cohérence, faisant suite à un changement subi, prescrit ou émergent.

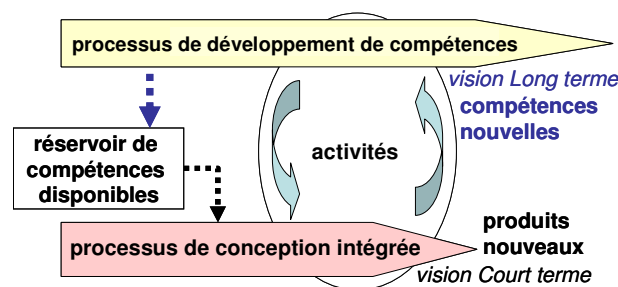


Figure 38 : Articulation entre les processus de conception et de développement de compétences

Le terme apprentissage est souvent utilisé dans un sens trop restrictif, limité au cas d'un apprentissage individuel et de plus, pas forcément conscient. Nous pensons important de mettre l'accent sur le caractère intentionnel du développement des compétences, au cours des activités (Figure 38). Des objectifs, des organisations, des plans d'actions, des moyens... doivent être définis

<sup>71</sup> La définition souvent admise par les industriels est celle qui a été énoncée par le Mouvement des Entreprises De France [MEDEF 2002] comme étant : "une combinaison de connaissances, savoir-faire, expériences et comportements s'exerçant dans un contexte précis. Elle se constate lors de sa mise en œuvre en situation professionnelle à partir de laquelle elle est validable".

<sup>72</sup> De nombreux schèmes des acteurs, même s'ils sont indispensables pour la bonne réalisation de leurs activités, ne sont pas reconnus, ni formalisés en tant que compétences (certains parlent alors de savoir-faire).

<sup>73</sup> Un plan d'action peut être défini de façon récursive, une action étant elle-même décomposée plus finement. De cette façon, nous pouvons parler d'un schème et des sous-schèmes composant ce schème.



pour piloter (identifier, orienter, structurer et gérer) les processus de développement des compétences individuelles et collectives.

#### 7.2.2.d. Modélisation des compétences collectives et de leur développement

L'analyse de la structuration d'un système de conception aussi complexe que DPMO nous oblige à élaborer des modèles de la structuration des compétences permettant de représenter les points suivants :

- emboîtements d'acteurs individuels et/ou collectifs en acteurs collectifs de différents niveaux, l'acteur de plus haut niveau étant l'entreprise (voire des groupements d'entreprise) ;
- déploiement d'objectifs et synthèse de résultats locaux<sup>74</sup> ;
- évolution conjointe des compétences d'un acteur avec sa situation de travail, au niveau horizontal (avec des acteurs de même niveau ou avec l'environnement extérieur) et au niveau vertical (co-évolution d'acteurs locaux et de l'acteur global).

Pour répondre à cette exigence de modélisation, nous avons utilisé le principe de récursivité.

Ce principe consiste à réaliser la modélisation à partir de concepts identiques à chaque niveau. Ainsi, nous avons étendu le concept de schème pour un acteur collectif. Un schème, individuel ou collectif, peut être décliné en une organisation de sous-schèmes (individuels ou collectifs).

Une compétence, individuelle, collective, sera alors modélisée par un couple {mission, schème} sur lequel est porté un jugement positif par un tiers (un manager, un client, un pair ...).

Ce principe oblige aussi à chercher dans chaque système une relation récursive qui permet de décomposer (ou de recomposer) un autre système. Il permet de décrire un système de façon hiérarchique : le niveau supérieur (sur-système) contraignant et étant produit par des systèmes de niveau inférieur. Les couplages entre niveaux ne sont ni prédéterminés, ni statiques. Ils se construisent au cours du temps, si bien qu'il y a co-évolution entre le système, ses sur-systèmes, et ses sous-systèmes.

Nous considérons que la mission d'un acteur de niveau N s'intègre dans le plan d'action d'un acteur de niveau N+1, correspondant à un choix d'organisation pour répondre à une mission (ou plus généralement, à des objectifs) de niveau N+1. Inversement, le plan d'action de niveau N ne se définit complètement que lorsque l'acteur de niveau N-1 accepte la définition de sa mission.

De cette façon, nous montrons que **le concept de niveaux de pilotage est relatif à l'acteur étudié** (Figure 39). Que cet acteur soit un individu, un collectif ou une entreprise, ces différents niveaux se retrouvent et se combinent, correspondant aux flux d'actions contrôlées (niveau opérationnel), aux plans d'actions (niveau tactique ou organisationnel) et à la mission (niveau stratégique) de l'acteur considéré.

Tout comme la conception d'un système définit progressivement ses missions, son architecture et ses composants, le développement d'une compétence se réalise par la construction/adaptation progressive de sa mission, de son plan d'actions et des règles de conduite qui contrôlent le flux d'actions réelles.

Il faut noter que le schème désigne une structure cognitive qui permet de reproduire, aux ajustements près, un même plan d'actions. Sous certaines conditions de stabilité de la situation de conception, une partie du schème peut être codifiée, pour le retour d'expérience<sup>75</sup>.

---

<sup>74</sup> La conception est considérée comme la résolution d'un problème global dont la décomposition est réalisée en différents sous-problèmes interdépendants et dont la résolution nécessitera de nombreuses itérations à l'intérieur de l'acteur en charge d'un sous-problème (interactions horizontales : échanges d'informations, gestion des interfaces, recherche de compromis...) ou avec le niveau supérieur (ou inférieur) (interactions verticales : demandes d'arbitrage, demandes sur les prescriptions (relaxation, précisions), proposition de résultats,...

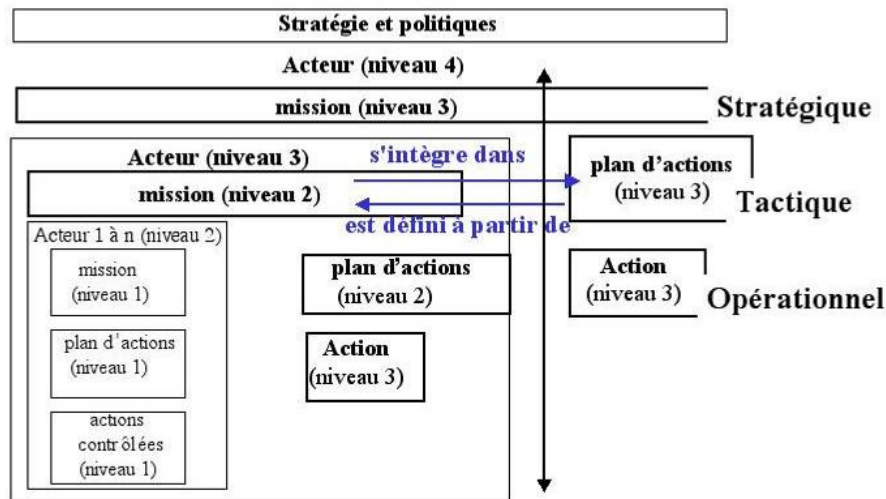


Figure 39 : Modèle récursif d'un acteur collectif sur plusieurs niveaux

Ces différents modèles ont été décrits dans les communications [CI.16, 18].

#### 7.2.2.e. Un dispositif de pilotage d'un système de compétences

Considérons un acteur collectif comme une entreprise, un département de conception ou un groupement d'entreprises. Cet acteur peut être représenté comme un système de compétences. Nous avons proposé un dispositif de pilotage d'un système de compétences en décrivant le rôle et les actions de chaque niveau. Le pilotage d'un système de compétences doit porter sur différents horizons temporels et niveaux hiérarchiques. Le pilotage opérationnel nécessite une responsabilisation des acteurs individuels et collectifs pour mobiliser, maintenir et développer leurs compétences. Le pilotage tactique (ou organisationnel) organise et favorise le développement des compétences en adéquation avec les orientations stratégiques de l'acteur concerné : définition et mise en place de plan d'actions de développement des compétences, nouvelles structurations des processus ou des acteurs, etc. Enfin, le pilotage stratégique définit les grandes orientations concernant les évolutions majeures en prenant en compte la dynamique possible des compétences et en formulant des besoins en compétences stratégiques de l'acteur.

Ce modèle a été décrit dans la communication [CI.8].

#### 7.2.2.f. Un cadre théorique du Management Stratégique Fondé sur la Compétence

L'objectif de la phase IV dite d'extensions de la recherche, était de proposer et mettre au point de nouveaux concepts, modèles, outils pour spécifier, structurer, développer et évaluer la compétence d'architecte-intégrateur de système, du point de vue stratégique et organisationnel. Les utilisateurs potentiels étaient des directeurs des métiers de la conception ou des architectes des GMP au sein de DPMO.

Le challenge de cette recherche en termes de pilotage des systèmes de compétences est de mieux coupler des décisions stratégiques avec des décisions organisationnelles et opérationnelles en conception. L'originalité a été de créer un cadre de modélisation pour rendre cohérent et compléter des corpus de connaissances provenant à la fois du management stratégique (qu'est-ce qu'une compétence stratégique ? quels sont les critères ? comment l'identifier ? quelles sont les activités à réaliser en interne ou à externaliser ? Etc.) et de l'ingénierie système (quels sont les

<sup>75</sup> Dans une organisation comme DPMO, sa codification est très poussée au niveau des collectifs : Organigramme Technique des Tâches (OTT) au sein de chaque métier, manuel expliquant l'IS Automobile, manuel qualité décrivant avec détail les processus opérationnels, supports et managériaux ...

processus d'IS à conserver pour un intégrateur ? comment décomposer un système en strate ? comment piloter un projet ? Etc.).

Nous avons caractérisé des activités et des principes définissant ce qu'est le Management Stratégique Fondé sur la Compétence (MSFC). Nous avons ensuite proposé des modèles et des outils, permettant d'aider le Directeur d'un Métier ou un architecte système dans le diagnostic ou dans la structuration du système de compétences de l'acteur collectif dont il a la responsabilité :

- un modèle de réseau de valeur stratégique, pour identifier les compétences critiques à développer en interne et pour caractériser les types de collaborations à engager avec les tiers (du contrat de fournisseur de composant au partenariat à long terme),
- un arbre de critère permettant de qualifier une compétence stratégique (spécification a priori d'une cible ou évaluation a posteriori) et
- une méthode de déploiement des prestations stratégiques du produit, sur les processus de conception et sur les compétences critiques des concepteurs, avec l'utilisation de matrices DSM.

Les deux derniers points seront présentés ultérieurement dans la section 7.6.

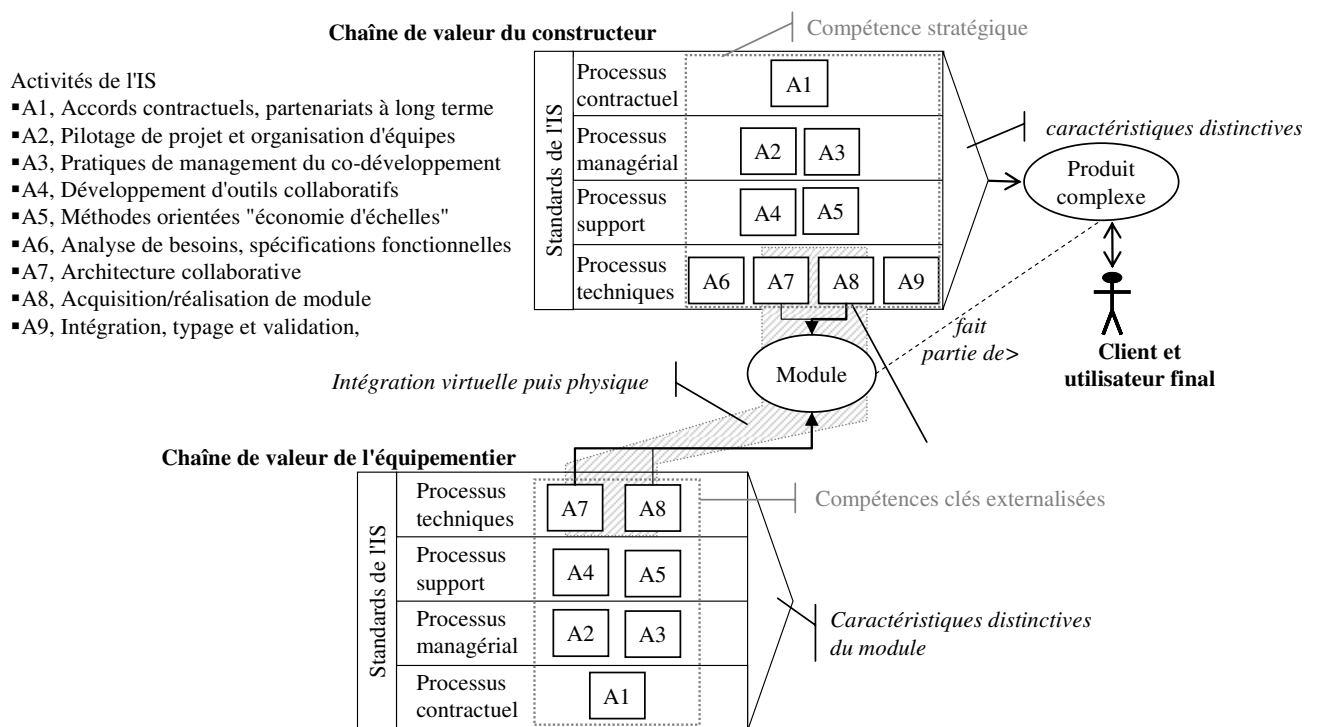


Figure 40 : Réseau de valeur stratégique adapté à l'ingénierie système

Le réseau de valeur stratégique (Figure 40) est une cartographie qui lie les chaînes de valeur de conception d'acteurs indépendants qui interagissent intentionnellement pour co-développer un système susceptible de procurer un avantage stratégique partagé. Ces chaînes de valeur intègrent des activités prenant en compte les différentes étapes du cycle de vie du système. La brique de base de ce modèle est la chaîne de valeur de Porter [1989]. Nous avons adapté et complété ce modèle selon les spécificités de la conception en Ingénierie Système.

### 7.2.2.g. Synthèse

Le but de ce projet n'était pas d'appliquer des méthodes existantes, de réaliser un diagnostic ou de développer un nouvel outil à partir d'un besoin formalisé. Il s'agissait de travailler sur les fondements conceptuels et méthodologiques de l'intégration des systèmes de compétences dans le pilotage d'un système (complexe) de conception. En ce sens, le contrat entre le LAB et PSA a été

défini, dès le départ, comme un projet de recherche sur le long terme ayant pour objectif de fournir un cadre conceptuel cohérent et solide pour une aide à la décision des Directeurs des Métiers de DPMO concernant l'évolution de leurs systèmes de compétences, c'est-à-dire le "cœur" de la conception.

### **7.2.3. Synthèse des contributions au pilotage du système de conception**

Le projet de recherche avec PSA Peugeot Citroën nous a permis d'acquérir des informations et de connaissances sur les systèmes de conception complexes et les activités d'un acteur clé en ingénierie système : l'architecte système. De leurs analyses, il est ressorti que pour la conception de telles organisations, les directeurs de métiers et les architectes systèmes requièrent :

- des outils d'optimisation permettant de mieux prendre en compte différents domaines du projet simultanément (par exemple, couplage produit / projet ; couplage tâches / compétences) et
- un pilotage des systèmes de compétences de conception, dans lequel les différents niveaux doivent être mieux articulés.

Cette analyse de terrain du secteur de la conception automobile a été confirmée par d'autres collaborations, que ce soit avec des industriels du secteur de l'ameublement ou de la construction bois ou dans le cadre du GT C2EI du GDR MACS.

Le cadre de modélisation proposé est un pas important vers une intégration des différents niveaux de pilotage des systèmes de compétences et la prise en compte des compétences dans le pilotage du système de conception. Nous pensons que les qualités attendues d'un tel cadre de modélisation sont bien remplies, à savoir :

- Relier les niveaux opérationnel, organisationnel et stratégique,
- Articuler une vue fonctionnelle, une vue structurelle et une vue évolutionniste d'un système de compétences,
- Manipuler des concepts semblables à chaque niveau d'acteurs (de l'individu au réseau d'entreprise).

Dans une étape ultérieure, des efforts de formalisation supplémentaires sont envisageables pour intégrer les modèles proposés dans des formalismes / langages de modélisation d'entreprise.

### 7.3. Contribution à la caractérisation d'une compétence en conception

Les évolutions rapides des exigences des clients, des technologies, des organisations, des méthodes et des outils de conception demandent aux concepteurs de développer constamment leurs compétences pour maintenir ou accroître les performances des projets de développement de nouveaux produits. Dans ce contexte, les managers et les concepteurs ont besoin d'outils pour les aider à améliorer la fiabilité de la caractérisation des compétences et à mettre à jour plus rapidement les référentiels de compétences des concepteurs, qui serviront ensuite pour affecter les concepteurs sur les projets.

Notre contribution à cette problématique est double : d'une part, une modélisation des situations de travail pour réaliser la traçabilité des activités de conception (axe "gestion des connaissances") et d'autre part, une caractérisation des compétences (axe "pilotage des compétences"). Ces travaux sont présentés en détail dans le mémoire de thèse de F. Belkadi (ainsi qu'un état de l'art approfondi sur ces deux axes). Un article accepté dans la revue JESA [R.10] décrit cette méthodologie en détail. Il est joint en Annexe 8.

Nous présentons par la suite uniquement les qualités attendues, la structure générale de la méthode, les conditions de test ainsi que les éléments de validation.

#### 7.3.1. Qualités attendues de la méthode

Pour être satisfaisante, une méthode de caractérisation des compétences doit répondre à plusieurs exigences ou contraintes :

- Fournir une caractérisation de compétences, utile à des fins de pilotage (évaluation, affectation, constitution d'équipes, mise en situation, formation),
- Manipuler des données objectives de l'activité de l'acteur, sans nécessiter une surcharge de travail (la méthode pourrait être considérée comme inutile),
- Etre fondée sur une théorie cognitive pour l'action, la compétence étant fondamentalement un concept cognitif sous-tendant un flux d'actions,
- Etre compréhensible par l'expert qui l'utilisera et par l'acteur qui sera évalué,
- Etre adapté aux types de situations concernées.

#### 7.3.2. Structure générale de la méthode

Pour définir la structure de notre méthode, nous avons analysé les travaux portant sur des méthodes de caractérisation et de construction des référentiels de compétences émanant du domaine de la Gestion des Ressources Humaines [Vidal *et al.*, 2002], [Rault, 1993].

Suite à cette analyse, pour caractériser les compétences, nous avons défini :

- une typologie de composants de compétences, qui a été justifiée par un modèle théorique de la compétence que nous avons élaboré,
- une échelle d'évaluation des niveaux de maîtrise, qui a été retenue à partir de la synthèse précédente sur les pratiques en GRH,
- une méthode de caractérisation floue d'une compétence. Son originalité provient des faits suivants : elle s'appuie sur un système de traçabilité des activités de conception visant à donner plus d'objectivité à la représentation de l'activité réelle de conception et elle vise une automatisation partielle des étapes empiriques de construction d'un référentiel [Vidal *et. al.*, 2002] (Figure 41).

Nous avons structuré cette méthode de caractérisation en trois modules (Figure 41).

Le module "capture et structuration des connaissances" est un système de traçabilité des activités de conception. Il remplace une étape empirique de recueil de données sur la situation de conception. Des connaissances issues de l'activité de conception sont tracées et structurées selon un modèle générique de la situation. Elles concernent la mission, l'organisation de l'activité, les relations entre les acteurs et les actions qui modifient l'état de la situation de conception.

Le module "caractérisation de la situation" contient un ensemble de variables qualitatives permettant de caractériser la situation à partir des données tracées et en lien avec les composants de la compétence. Ce module correspond à une étape d'analyse qualitative des données sur la situation.

Le module "caractérisation (floue) de la compétence" permet de lier formellement les variables caractérisant la situation avec les composants de la compétence associée. Un système de traitement flou permet de représenter le raisonnement de l'expert qui tente d'estimer le niveau de maîtrise de chaque composant de la compétence. Ce module correspond à une étape empirique de déduction et d'évaluation de compétences. Les composants de la compétence sont définis selon un modèle théorique de la compétence. Ce modèle permet de définir la structure du référentiel de compétence.

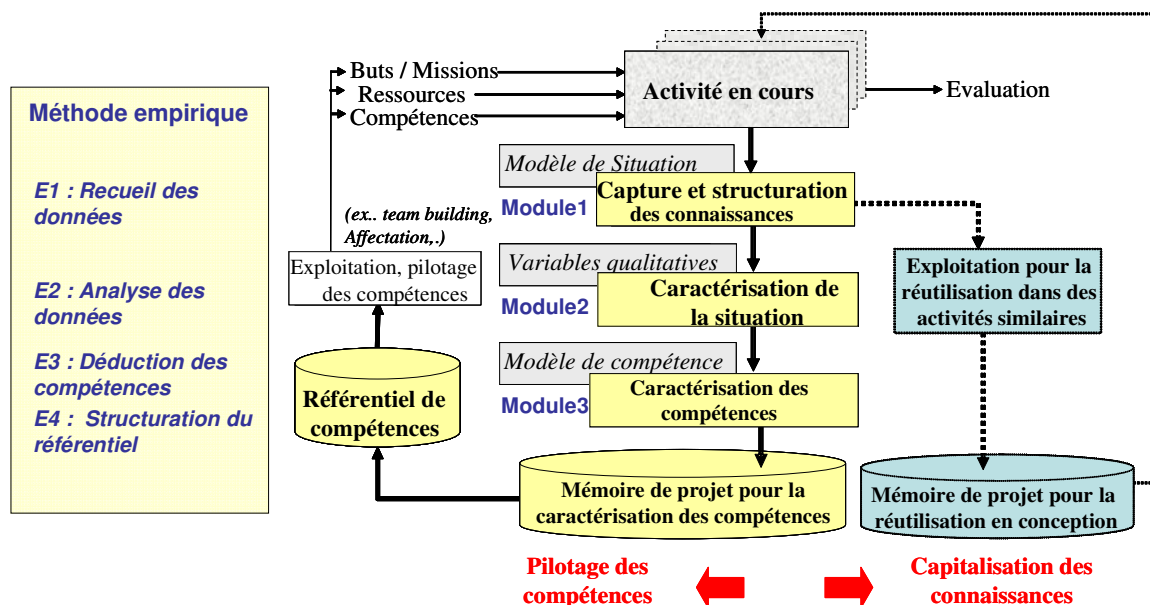


Figure 41 : Structure générale de la méthode de caractérisation

Les modèles de la situation que nous proposons peuvent aussi être utilisés pour structurer des données dans une mémoire de projet (axe : capitalisation des connaissances) et pour supporter l'activité collaborative du concepteur dans la résolution future de problèmes similaires. Nous avons présenté la spécification d'un tel outil informatique dans l'article [R.3].

### 7.3.3. Test du principe de la méthode

Afin de tester le principe de solution proposé, nous avons appliqué notre approche sur un cas industriel. L'exemple traité concerne un projet de conception d'un nouveau meuble TV destiné aux écrans LCD. Nous avons opté pour ce terrain d'application pour des raisons de facilité d'accès aux données nécessaires pour renseigner les modèles proposés. Ce projet a été réalisé dans une entreprise de conception et fabrication de meubles, Parisot Meubles<sup>76</sup>, par deux étudiants<sup>77</sup>

<sup>76</sup> Filiale du Groupe Parisot, leader français de la fabrication de meubles

concepteurs dans le cadre de leur projet de fin d'études. Le but du projet a été à la fois industriel et pédagogique. Les étudiants ont été immergés d'abord dans le service "création" et ensuite dans le service "conception". Ils ont eu ainsi une vision transversale d'un projet de conception d'un nouveau meuble.

Les propositions des étudiants ont été approuvées, phase par phase, par les responsables techniques de l'entreprise. Cela signifie selon leur tuteur industriel (responsable du service conception), que les étudiants ont acquis et validé, à la fin de leur expérience, des compétences de concepteurs.

#### 7.3.4. Eléments de validation et synthèse

Nous avons proposé une nouvelle démarche pour aider les managers à caractériser les compétences de l'entreprise. Son principal avantage est qu'elle est basée sur la traçabilité des informations de conception et peut donc être utile aussi pour la capitalisation des connaissances. L'intérêt d'une telle articulation est d'améliorer le processus de construction de référentiels en se basant non pas sur les estimations subjectives d'un acteur humain (souvent, le manager) mais sur une évaluation automatique de données réelles obtenues à partir de traces capitalisées tangibles. Ceci doit permettre d'améliorer la précision et la fiabilité des informations contenues dans les référentiels des entreprises et d'ajouter un caractère "dynamique" à ces référentiels afin qu'ils prennent en compte, par des mises à jour régulières, les développements technologiques et les évolutions permanentes sur les méthodes de travail, sur les connaissances techniques, etc. Le "principe de solution" proposé ouvre la porte à de nouvelles fonctionnalités pour les systèmes de capitalisation de connaissances, autres que celles de la constitution de mémoire de projet, utile pour la réutilisation et l'aide à la conception technique.

Nous présentons dans le Tableau 26 une estimation qualitative du niveau de satisfaction des exigences ou contraintes que nous avons définies en 7.2.1. Nous estimons que la méthode satisfait très favorablement l'exigence E2 (explication précédente) et les contraintes C1 (modèle de la compétence fondé sur la théorie des schèmes – validation empirique par G. Vergnaud) et C3 (variables qualitatives issues d'une description des objets et activités de conception).

Nous sommes conscients qu'un test de la méthode uniquement sur des activités d'étudiants immergés en entreprise peut être entaché de biais. Cependant, nous pensons que cela nous permet au moins de valider le "principe de solution", c'est-à-dire le concept de caractérisation à partir d'une traçabilité des informations et la structure globale de la méthode. L'analyse des résultats obtenus avec les étudiants et le responsable du service de conception a mis en évidence ce que les étudiants ont acquis pendant leur projet (nouvelles connaissances, meilleure capacité d'organisation), ce qu'ils n'ont pas pu développer car les missions ne l'exigeaient pas (capacité relationnelle peu élevée) et éventuellement, ce qu'ils auraient pu mieux développer (capacité d'analyse sur la mission "création du meuble"). Les informations recueillies durant l'activité sont alors des preuves tangibles servant lors de l'évaluation de compétences.

Dans une conception détaillée et la mise en œuvre dans un service de conception, l'ensemble des acteurs devrait être impliqué afin de discuter sur les objectifs de la méthode, sur les informations objectives à recueillir, sur les composants de la compétence et sur leurs relations, et enfin, d'adapter les modèles proposés.

En prenant connaissance du travail de [Rose *et al.*, 2006], nous avons noté que les composants identifiés pour caractériser les compétences sont assez proches, ce qui nous conforte dans le fait que les résultats de la méthode proposée peuvent être exploités pour une problématique d'affectation.

---

<sup>77</sup> Etudiants en dernière année du master Ingénierie Système appliquée aux industries du bois. Pour la validation empirique du principe de solution de la méthode, il est important de savoir qu'ils avaient déjà vécu des expériences en conception de meubles.

Nous estimons donc globalement que l'exigence E1 et la contrainte C2 sont favorablement satisfaites.

Exigences ou contraintes	Estimation qualitative	Difficultés observées, risques	Levée de risque
E1 : Caractérisation de compétences, utile à des fins de pilotage	+	Biais introduits par un projet d'étudiants	Autres applications
E2 : Manipuler des données objectives	+ (+)	Lourdeur des saisies	Données pour capitalisation
C1 : Etre fondée sur une théorie cognitive	++		
C2 : Etre compréhensible	+	Non compréhension de certaines variables	Discussion, implication des acteurs
C3 : Etre adapté à la situation concernée (ici, conception)	++		

**Tableau 26 : Estimation qualitative**

Nous présenterons à la fin de cette partie les perspectives d'amélioration de cette méthode.

## 7.4. Contribution à la constitution d'équipes compétentes

Dans cette section, nous présentons une méthode de constitution d'équipes de conception en tenant compte des compétences des acteurs. Un article accepté dans la revue "International Journal of Management Science and Engineering Management" [R.8] décrit cette méthode en détail. Il est joint en Annexe 7. Nous présentons par la suite uniquement les qualités attendues, la structure générale de la méthode, les conditions de test ainsi que les éléments de validation.

### 7.4.1. Qualités attendues de la méthode

Concevoir est une activité complexe qui nécessite des savoirs hétérogènes pour transformer un ensemble d'exigences et de contraintes en un artefact qui satisfasse tous les critères d'évaluation. En raison de la complexité croissante des produits, le nombre de tâches interdépendantes devient grand (de l'ordre de  $10^3$  dans la conception d'un GMP).

L'architecte système doit disposer d'une méthode d'aide à l'affectation de tâches à des acteurs, qui est une étape préliminaire à la constitution d'équipes. Les qualités attendues d'une telle méthode sont les suivantes :

- E1 : minimiser le coût de réalisation des tâches,
- E2 : affecter des tâches à des acteurs selon leurs compétences, en tenant compte d'un surcoût lié à un "manque" de compétences,
- E3 : fixer des objectifs ou contraintes de développement de compétences.

### 7.4.2. Structure générale

Nous avons proposé une méthode d'aide à la constitution des équipes d'un projet de conception, prenant en compte les deux premières exigences.



Concernant la troisième exigence, afin de privilégier le développement d'expertise, nous proposons de regrouper les acteurs, avant l'affectation, en favorisant les proximités entre leurs compétences. Cette étape permet de préciser la spécialisation d'un acteur et de lui affecter prioritairement une tâche dont il est spécialiste. Elle est facultative dans le problème d'affectation.

Les trois étapes de la méthode (Figure 42) sont les suivantes :

- génération d'une matrice de compétence fournissant une mesure de compatibilité d'un acteur pour réaliser une tâche,
- regroupement entre tâches et acteurs en utilisant un algorithme de regroupement (Rank Order Clustering-ROC),
- affectation des tâches à des acteurs pour constituer les équipes en minimisant le coût total du projet.

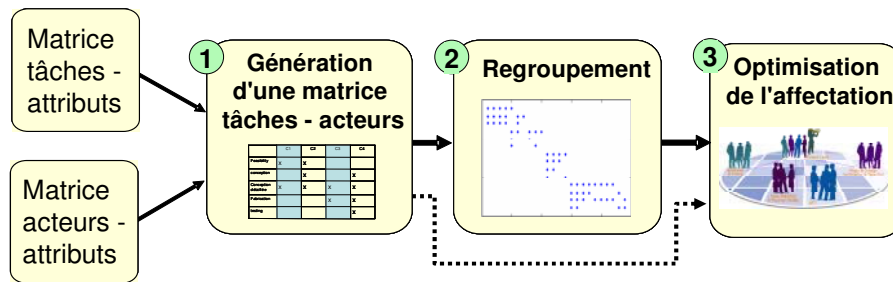


Figure 42 : Structure de la méthode de constitution d'équipes

#### 7.4.2.a. Génération d'une matrice d'incidence tâche / acteur

Cette étape se décompose en 5 phases :

- Identifier des attributs pertinents pour caractériser la tâche et l'acteur (par exemple, des savoir-faire techniques, des capacités relationnelles ...).
- Pour chaque tâche, évaluer le niveau de performance requis pour chaque attribut.
- Pour chaque acteur, évaluer le niveau de performance acquis pour chaque attribut.
- Définir un indicateur de compatibilité entre la tâche et l'acteur.
- Générer une matrice d'incidence tâche/acteur (ou matrice de compétence).

Les points clés résident dans la modélisation d'une compétence (requis / acquise) et dans le choix de l'indicateur de compatibilité. Il s'agit de définir une mesure de similarité. La distance de Hamming [Boucher et Burlat, 2003] est souvent utilisée dans la sélection de membre d'une équipe, l'objectif étant de trouver la distance la plus faible entre deux ensembles d'attributs pour trouver le candidat le plus approprié. Cependant comme d'autres mesures existantes, elle ne distingue pas les écarts positifs et les écarts négatifs. Or, une valeur d'écart positive correspond à un niveau de sur-compétence, tandis que la valeur d'écart négative correspond à un niveau de sous-compétence. Nous avons donc proposé un indicateur de compatibilité adapté à notre problème.

#### 7.4.2.b. Regroupement des tâches et acteurs

Le regroupement entre tâches/acteurs est réalisé par application de l'algorithme ROC. Nous avons appliqué cet algorithme de *clustering* à la matrice tâche/acteur. Cependant, il est nécessaire de réaliser une inspection visuelle pour déterminer la formation de blocs diagonaux. Pour pallier cet inconvénient, nous avons adopté un indicateur de densité de groupe (GDI-Group Density Index) proposé par [Tseng *et al.* 2004]. Cet indicateur permet d'identifier les groupes potentiels après avoir utilisé l'algorithme ROC.

### 7.4.2.c. Optimisation de l'affectation des tâches

L'objectif de cette étape est d'affecter l'ensemble de tâches à un ensemble d'acteurs en tenant compte de leurs compétences et du coût salarial total. Un modèle mathématique a été formulé sous la forme d'un programme linéaire en nombre entier, visant à minimiser le coût salarial des équipes multidisciplinaires.

Nous avons modélisé les hypothèses suivantes :

- En dessous d'un certain niveau  $M_i$  pour l'indicateur de compatibilité, les acteurs ne sont pas compétents et ne peuvent donc pas être sélectionnés ;
- Les acteurs novices (ou légèrement sous-compétents) ayant un niveau de compétence inférieur au niveau requis par la tâche  $RQ_i$  pourront être sélectionnés mais seront pénalisés par un surcoût lié à une courbe d'apprentissage (durée de réalisation supplémentaire, sollicitation d'un expert pour des demandes d'informations et de conseils).
- Les acteurs experts n'auront pas de surcoût, ni de réduction de coût s'ils sont "sur-compétents" pour la tâche demandée.
- Pour simplifier la formulation du problème, nous supposons que la durée de réalisation nominale des tâches est la même (ainsi, nous ne prenons pas en compte une limitation par la charge de travail).

### 7.4.3. Test du principe

Nous avons créé des cas d'école suffisamment réalistes pour nous permettre d'en tirer des éléments de validation.

Task / Actor	A3	A10	A8	A1	A11	A4	A5	A7	A2	A6	A9
T4	0,94	0,75	0,72	0,72	0,55	0,28	0,17	0,11	0,06	0,11	0,00
T1	0,86	0,74	0,68	0,69	0,51	0,21	0,14	0,10	0,03	0,07	0,00
T6	0,78	0,65	0,73	0,65	0,56	0,22	0,22	0,17	0,17	0,09	0,00
T2	0,08	0,11	0,08	0,08	0,06	0,50	0,58	0,64	0,54	0,25	0,25
T5	0,00	0,04	0,17	0,13	0,09	0,65	0,65	0,70	0,67	0,22	0,22
T7	0,03	0,10	0,07	0,03	0,03	0,07	0,07	0,07	0,69	0,76	0,76
T3	0,00	0,05	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,63	0,84	0,79
Salary	2070	2500	2610	2400	2700	2300	2800	2150	2250	2200	1620

Figure 43 : Regroupement de tâches et acteurs

	P3	P10	P8	P1	P11	P4	P5	P7	P6	P2	P9
T4	0	0	0	1	0						
T1	0	1	0	0	0						
T6	1	0	0	0	0						
T2						0	0	1			
T5						0	1	0			
T7									0	0	1
T3									1	0	0

Figure 44 : Affectation des tâches aux acteurs

### 7.4.4. Eléments de validation et synthèse

La méthode proposée fournit une aide à la constitution d'équipes multidisciplinaires. Elle peut être utilisée dans une activité organisationnelle de pilotage d'un projet, dans le but de minimiser les coûts et de tenir compte des compétences des acteurs.

Nous avons montré, à partir d'un exemple, le rôle de l'étape 2 (utilisation du regroupement des acteurs en fonction de leurs compétences), et les différences en termes de développement de compétences et de coût, selon l'estimation du niveau de compétence requis par chaque tâche. En utilisant l'étape 2, l'optimisation est une somme de minimums locaux favorisant le développement de l'expertise plus efficacement que dans le cas d'une optimisation globale qui favorise le coût du projet.

La validation de cette méthode est partielle puisqu'elle n'a été testée que sur un cas d'école et que nous n'avons pas pris en compte un objectif chiffré de développement de compétences. La prise en compte de l'évolution de la compétence après réalisation d'une tâche nécessite de traiter un

problème d'affectation multi-périodes. Cette problématique sera présentée dans les perspectives de cette partie.

Le Tableau 27 donne une estimation qualitative de la satisfaction des qualités attendues.

Exigences	Estimation	Limites de la validation - risques	Levée de risque
E1 : minimiser le coût de réalisation des tâches	+ +	Test sur un cas d'école	Modélisation inspirée des caractérisations de compétences réalisées au sein de DPMO
E2 : affecter des tâches à des acteurs selon leurs compétences	+ +		
E3 : fixer des objectifs ou contraintes de développement de compétences	-	Non modélisée	-

**Tableau 27 : Estimation qualitative de la méthode**

### 7.5. *Extension des DSM pour structurer les Métiers de la conception*

Nous avons proposé une extension des matrices DSM à ce que nous avons appelé une DSM-compétence. Le but est de cartographier et de structurer les métiers de la conception pour fournir une aide à une réorganisation des métiers lorsque les produits conçus ou que les méthodes de conception évoluent fortement.

Nous définissons un Métier comme étant un ensemble d'acteurs réalisant un ensemble de tâches semblables (donc avec des compétences homogènes) ou fortement interdépendantes.

Le point de départ est de définir les principes de structuration d'un Métier, c'est-à-dire ce qui crée la cohésion d'un Métier. Nous avons retenu les principes suivants :

- un objet commun à concevoir (par exemple, au niveau global de DPMO, la différenciation des Métiers est réalisée selon la filière Métier Liaison Au Sol ou la filière Métier GMP. A un autre niveau, un Métier peut se créer autour d'un module fonctionnel à concevoir, comme par exemple, l'actionnement-commutation dans une boîte de vitesse robotisée),
- des tâches à réaliser communes, correspondant éventuellement à des processus de l'IS (par exemple, Conception Fonctionnelle du GMP, Intégration et Validation du GMP, ...) ou une synthèse globale à la fois technique et organisationnelle sur les projets (par exemple, conduite de l'ingénierie, architecte système),
- des connaissances communes relatives à un champ disciplinaire (par exemple, chimie des carburants, combustion essence et diesel, acoustique-vibratoire, contrôle-commande global du moteur) ou de façon assez proche, à l'utilisation d'outils et de méthodes (par exemple, sûreté de fonctionnement, assurance qualité opérationnelle).

Dans la réalité, ces différents principes se trouvent entremêlés ou hiérarchisés lors de la structuration d'un acteur-métier.

Nous avons proposé deux approches différentes pour obtenir une structuration des Métiers. Dans la première situation, nous demandons aux directeurs et experts d'un périmètre donné de conception de lister l'ensemble des tâches à réaliser. Nous leur demandons ensuite de déterminer la

proximité cognitive entre chaque tâche en estimant les connaissances ou les méthodes qu'elles partagent. La proximité est estimée sur une échelle [0, 10]. Partant de cette DSM numérique, nous appliquons l'algorithme de *clustering* proposé pour faire ressortir des groupements de tâches structurées selon le troisième principe présenté ci-dessus.

Dans la seconde situation, nous construisons une matrice d'incidence couplant l'espace des tâches à réaliser à l'espace des méthodes et des outils, requis dans le périmètre de conception étudié. L'application d'une méthode, que nous avons développée (une MI => deux DSM) mais qui n'est pas présentée dans ce mémoire, nous permet de trouver une architecture possible des tâches de conception.

Nous avons appliqué ces méthodes pour proposer une structuration des compétences de la conception fonctionnelle du GMP au sein de PSA/DPMO. La Figure 45 montre une DSM de taille réelle, construite avec l'aide d'experts de PSA/DPMO début 2007. Pour des raisons de confidentialité, cette DSM ne peut pas être rendue complètement lisible.

L'architecture de cette DSM montre des modules de champs disciplinaires requis pour concevoir un groupe motopulseur hybride, et donc, par incidence, les regroupements d'individus susceptibles de constituer un Métier. A titre d'exemple, les compétences suivantes ont été regroupées dans un même module : Conception de la Fonction Dépollution, Modélisation de la chimie de la combustion, Synthèse Sous-traitance FAP / Catalyseur, Synthèse Sous-traitance sonde, Spécification des Carburants.

Cette DSM permet de repérer, selon un principe de structuration donné, les proximités entre certaines tâches en termes de connaissances. Elle montre aussi les connaissances qui sont en chevauchement entre deux Métiers et des connaissances intégratives à l'intérieur d'un Métier (ce qui peut correspondre à un niveau d'expert dans le Métier).

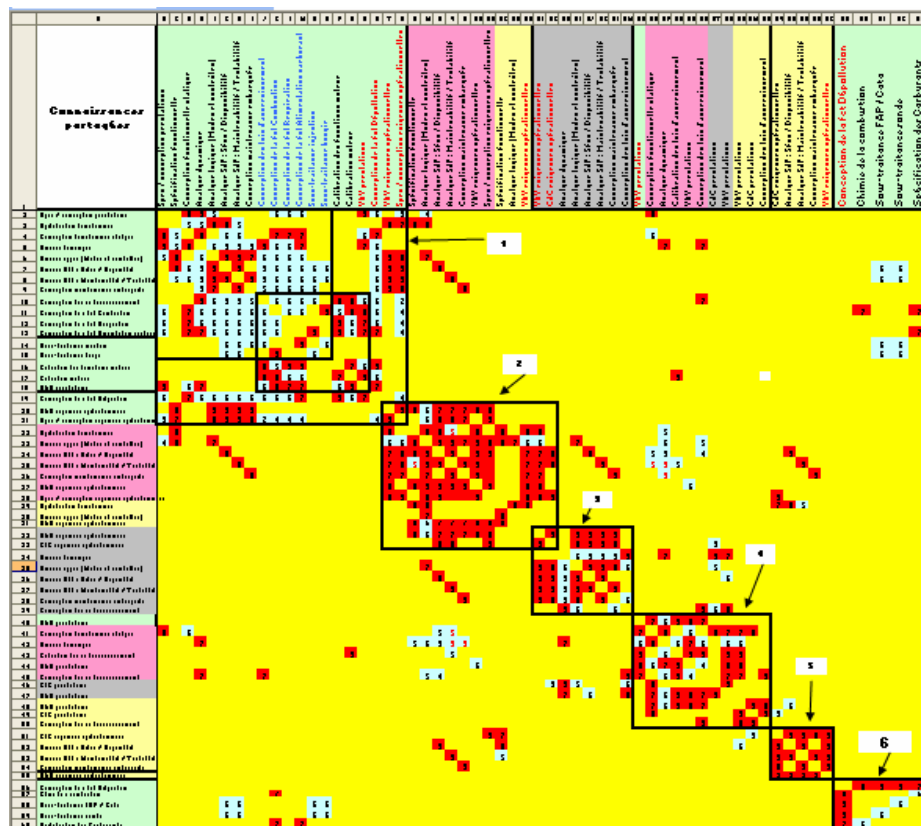


Figure 45 : DSM-connaissances pour structurer un acteur Métier

## 7.6. Contribution à la qualification et au déploiement d'une compétence stratégique en conception

Lorsqu'un architecte système se trouve devant des choix stratégiques pour définir les orientations de la conception d'un nouveau produit (ou d'une nouvelle famille), il a besoin de méthodes et d'outils lui fournissant une aide à la décision pour :

- qualifier le caractère stratégique de la compétence qu'il va chercher à construire avec son équipe, et
- déployer cette compétence cible (supposée devenir stratégique) au sein de son organisation et ainsi repérer les compétences clés.

Ces deux activités sont essentielles pour bien comprendre ce qui permet d'obtenir un avantage concurrentiel et éviter que le produit (le résultat) et la compétence qui l'a conçu (l'organisation collective) ne soient trop rapidement copiés par les concurrents. Dans le cadre du projet PSA/DPMO, nous avons développé et appliqué une méthode de qualification et déploiement d'une compétence stratégique<sup>78</sup> cible dans le cadre d'un projet de conception d'une nouvelle boîte de vitesse robotisée.

### 7.6.1. Outil de qualification du caractère stratégique

Nous avons développé un arbre de critères, en collaboration avec les architectes et directeurs métiers et à partir d'une synthèse bibliographique, pour qualifier le caractère stratégique d'une compétence que l'équipe projet doit développer.

L'intérêt de cet outil réside surtout dans le fait que les architectes prennent conscience des critères de choix stratégiques. Cet aspect est aussi important que l'estimation elle-même.

Il peut servir, lors de la revue d'engagement du projet, pour permettre à un architecte ou un directeur de projet, d'estimer les forces et faiblesses de l'équipe de conception et décider d'engager ou non le projet (et donc de se lancer dans le développement de cette compétence) ou en phase de bilan, pour estimer le niveau atteint et les points faibles de la compétence développée.

L'arbre de critères (Figure 46) repose sur des dialogues ou vues différentes sur la compétence :

- coût d'acquisition et de pérennisation / valeur stratégique,
- valeur externe / valeur interne, la valeur externe étant obtenue, soit par un avantage compétitif (rareté, inimitabilité), soit par une valeur pour les parties prenantes ("stakeholders") qui sont ici
  - soit les fournisseurs (coopération avec tiers),
  - soit les organismes de normalisation (avance réglementaire),
  - soit la société en général avec des valeurs nouvelles comme le respect de l'environnement, la sécurité des personnes, (adhésion sociétale) ...

La valeur interne repose sur 3 vues complémentaires d'une compétence :

- cognitive avec le degré de complexité de l'activité réalisée (ou à réaliser) et la généralité de la mission (est-ce que ce qui a été fait pour remplir la mission pourra être réutilisé ?),

---

<sup>78</sup> Notons que le terme fréquemment utilisé "compétence stratégique" est une traduction du terme "core competence" mais n'est pas fidèle au sens anglo-saxon. Initialement, il s'agit des compétences du "cœur de métier" qui doivent (ou sont supposées) permettre d'initier un avantage concurrentiel. Une compétence, à vrai dire, n'existe que lorsque l'activité a eu lieu et qu'elle a été reconnue par un tiers (le manager, le comité de pilotage, le marché...) comme réussie. La compétence renvoie à une activité passée. La stratégie renvoie à une projection sur l'avenir. C'est pourquoi nous devons plutôt parler de "compétence stratégique cible" pour définir une compétence dont le développement est requis. D'ailleurs, dès que cette compétence sera acquise, il faudra en développer une nouvelle pour conserver ou accroître son avantage concurrentiel.

- architecturale, en lien avec le type de compétences à développer par les équipes : modulaire ou intégrative,
- temporelle, en ce qui concerne la capacité de l'entreprise à incorporer, au mieux, la compétence stratégique en interne (incorporation) et à assurer sa pérennité.

Enfin, le coût d'acquisition et de pérennisation de la compétence stratégique dépend du niveau acquis au début de la mission, des efforts nécessaires à contextualiser la mission (étude de marché, benchmarking, état de l'art technologique, ...), à conceptualiser les solutions techniques (spécification, modélisation multi-physique, intégration virtuelle, pré-calibration, ...) ainsi que les pratiques de management de projets (processus de co-développement, mise en place d'acteurs de liaison ...) et enfin, à capitaliser les connaissances (rédaction des dossiers de justification, ...).

L'estimation se fait avec une notation entre 0 et 1 pour chaque critère. Plus la valeur est forte, plus le critère contribue à fournir un avantage stratégique. Une méthode d'agrégation par moyenne pondérée est réalisée pour agréger les critères de type coût et les critères de type valeur. Son prototype, développé à l'aide d'un tableau, a été validé dans le cas d'un projet de conception innovante, d'avance de phase, relatif à une boîte de vitesse robotisée d'entrée de gamme.

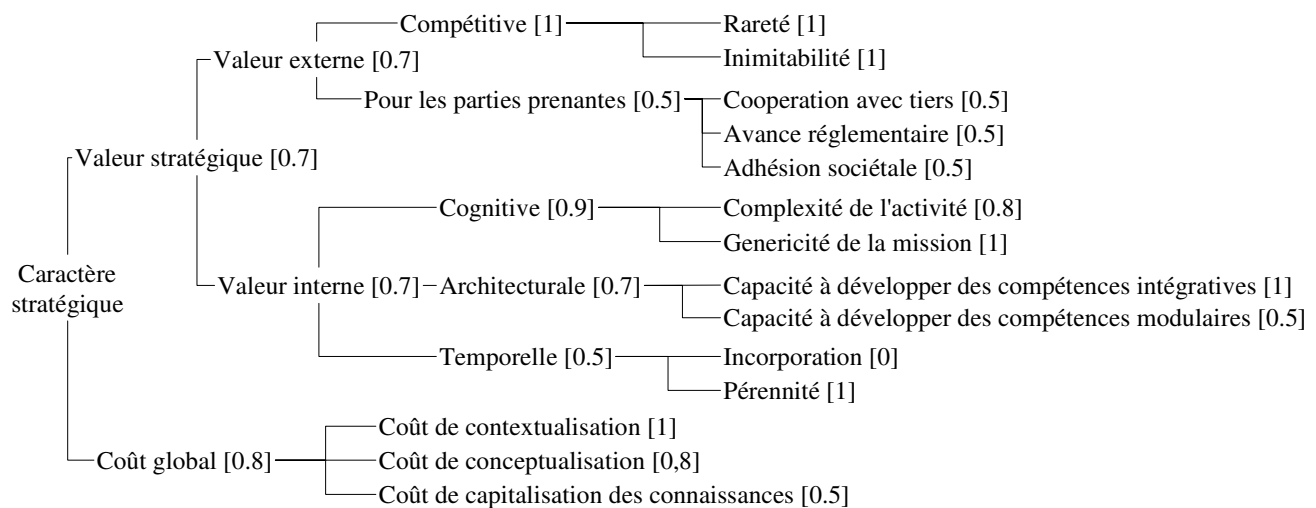


Figure 46 : Exemple de qualification d'une compétence d'architecte de boîte de vitesse

### 7.6.2. Méthode de déploiement d'une compétence stratégique

Nous avons développé une méthode permettant de propager le caractère stratégique des prestations du produit vers les processus de conception, puis vers les acteurs de la conception (Figure 47). De cette façon, nous avons mis en évidence que le choix de modules ou d'éléments intégrateurs sur le produit a un impact fort sur le caractère stratégique des compétences qui seront chargées de les concevoir.

La Figure 48 présente l'architecture d'une DSM acteur sur un projet de conception d'une boîte de vitesse robotisée<sup>79</sup>. La prestation stratégique "agrément de conduite" est principalement affectée à la fonction système "commutation" qui spécifie les phases du changement de rapport et dont a la charge l'Architecte Fonction Système Commutation (ARFS COM). Cette compétence de spécification, associée à la détermination des lois de contrôle-commande de la boîte de vitesse robotisée, est une compétence critique et intégratrice du module actionneur (ACT) – synchro (SYN) – commandes internes (fourchettes, ...) (CDI). La spécialisation poussée sur la conception détaillée du synchro (forme géométrique, matériau, tribologie) peut aussi être considérée comme une compétence critique de spécialisation en raison du rôle clé du synchro dans l'adaptation de la boîte de vitesse mécanique en boîte de vitesse robotisée. Ainsi, cette méthode n'a pas qu'une

<sup>79</sup> Le terme BVMP est aussi utilisé pour Boîte de Vitesse Mécanique Pilotée.

fonction organisationnelle, qui est d'architecturer les acteurs de conception, mais aussi stratégique, qui est d'identifier les tâches, acteurs et compétences critiques. Celles-ci peuvent être spécialisées (propres à un module, donc à un champ de connaissances connexes) ou intégratives (par exemple liés à la spécification et synthèse d'une fonction intégratrice du produit, etc.). Les compétences intégratrices sont moins copiables que les premières, surtout si les compétences spécialisées sont mono-disciplinaires.

#### Caractéristiques

- Transmission pilotée à 6 rapports
- Gestion électronique de l'embrayage et du passage des rapports : pédale d'embrayage supprimée
- Compatibilité avec la plate-forme 2 du groupe
- Adaptable sur motorisations essence et diesel
- Couple maximum : 270 Nm
- Consommation réduite de 3 à 5 %

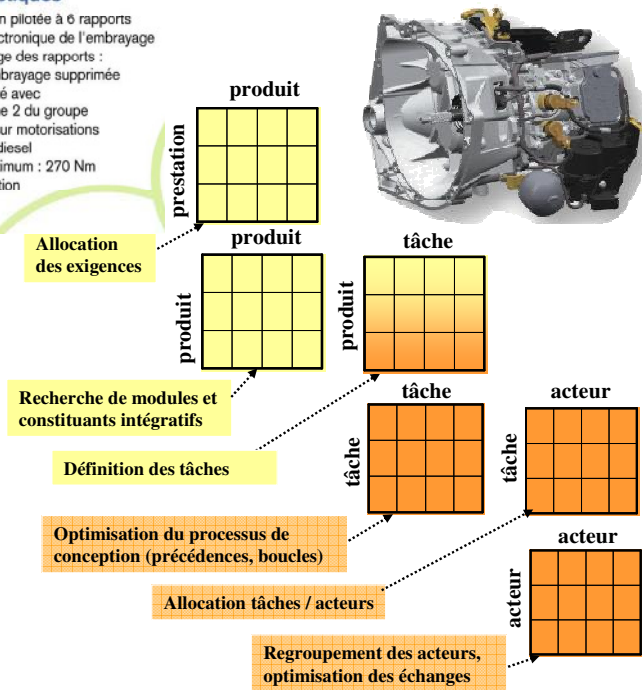


Figure 47 : Méthode de déploiement d'une prestation stratégique vers les compétences des concepteurs

		Archi.Syst.	CdP MIV	ARFS TPU	ARFS COU	ARFS EFF	ARFS COM	ARFS VOL	ARFS COM'	CdP ACT	CdP SYN	CdP CDI	ARFS COU'	CdP EMB	CdP CIE	ARFS TPU'	CdP DIFF	CdP MEI	ARFS EFF'	CdP CART
Architecte Système, chef de projet	Archi. Syst		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
CdP Modél., Intég., Valid.	CdP MIV	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Archi. FS Transmission Puissance	ARFS TPU	X	X		X	X		X												
Archi. FS Couplage	ARFS COU	X	X	X		X		X												
Archi. FS reprise Effort	ARFS EFF	X	X	X	X			X												
Archi. FS Commutation	ARFS COM	X	X					X												
Archi. FS Volumes	ARFS VOL	X	X	X	X	X	X													
Archi. FS Commutation	ARFS COM'	X	X							X	X	X								
CdP Actionneur	CdP ACT	X	X						X			X			X					
CdP Synchroniseur	CdP SYN	X	X						X			X								
CdP Commande interne actionnement	CdP CDI	X	X						X	X	X									
Archi. FS Couplage	ARFS COU'	X	X										X	X						
CdP Embrayage	CdP EMB	X	X									X								
CdP Commande interne embrayage	CdP CIE	X	X							X		X								
Archi. FS Transmission Puissance	ARFS TPU'	X	X														X	X		
CdP Différentiel	CdP DIFF	X	X													X				X
CdP pièces de Mécanique Interne	CdP MEI	X	X													X				
Archi. FS reprise Effort	ARFS EFF'	X	X																	X
CdP Carter	CdP CART	X	X														X		X	

Figure 48 : Architecture d'une "DSM Acteur" du projet de conception d'une boîte de vitesse robotisée

## 7.7. Bilan et perspectives

Les contributions précédentes sont issues :

- des travaux de doctorat de F. Belkadi [Th.2] et de O. Hlaoittinun [Th.4],
- des entretiens avec des directeurs des Métiers et des projets<sup>80</sup>, et des analyses de terrain réalisées auprès des architectes systèmes et ingénieurs,
- des collaborations pluridisciplinaires menées avec des chercheurs en Sciences Humaines et Sociales ou en Sciences Pour l'Ingénieur.

Le Tableau 28 donne un aperçu des communications relatives au thème de la conception des organisations. La tendance générale de nos contributions suit une évolution, partant du pilotage des systèmes de compétences vers un thème plus global d'organisation du système de conception.

Contexte à l'origine	Nature de la contribution	Publications, communications
Contrat PSA/DPMO	Modèle du pilotage des activités en IS	[Ch.1]
	Modèle de la compétence	[CI. 1, 2, 5, 7, 9, 11]
	Modèle récursif des compétences et de leur développement	[CI.16, 18]
	Dispositif de pilotage des compétences	[CI.8, 27]
	Modèle du déploiement d'une compétence stratégique sur des compétences collectives	[CI.5, 8]
Collaborations GT C2EI	Etat de l'art sur le pilotage des compétences dans les processus industriels	[R.5]
	Du retour d'expérience au développement des compétences	[CI.17, Ch.3]
Thèse F. Belkadi	Méthode de caractérisation floue des compétences en conception	[R.6, 10], [CI.23]
	Spécification d'un système informatique de conception collaborative et de mémoire de projet	[R.3, 4], [Ch3], [CI.15, 19-22, 33]
Thèse O. Hlaoittinun	Constitution d'équipes de projet	[R.8], [CI.28-30]

**Tableau 28 : Bilan quantitatif des contributions de la partie V**

Nous présentons maintenant plusieurs perspectives de recherche qui découlent des contributions précédentes, plus précisément de leurs limites ou d'extensions envisageables, à court terme.

<sup>80</sup> Dans le cadre du projet de recherche avec la Direction des Plateformes et des Métiers de conception des Organes GMP et LAS au sein de PSA Peugeot Citroën



## Caractérisation des compétences

Notre première application en milieu industriel nous a permis de confirmer la validité de ce principe de solution pour résoudre ce type de problématique. D'autres applications sont à prévoir pour confirmer la maturité de nos concepts. Selon le vocabulaire et les pratiques de l'entreprise, les composants de la compétence et les variables que nous avons proposés peuvent être adaptés, sans remettre en cause le cœur de la démarche.

Cependant, certaines limites de ce travail peuvent être liées à la complexité de la phase d'extraction des informations dans le cas où la granularité demandée est trop élevée. L'efficacité du module de traçabilité repose sur la motivation du concepteur à renseigner les informations décrivant son activité. Certains facteurs peuvent le démotiver : la durée de la saisie, la crainte que ces informations soient utilisées pour le contrôler, l'incompréhension de la modélisation. Une façon d'inciter ce concepteur à adopter la démarche serait d'intégrer les modèles dans les systèmes informatiques d'utilisation quotidienne. Ces outils peuvent aussi lui offrir l'opportunité de pouvoir partager son expérience avec d'autres, d'identifier les meilleures pratiques pour améliorer sa performance et de prouver qu'il est compétent.

Une autre limite de la démarche, que l'on retrouve souvent dans des approches qualitatives d'aide à la décision, provient du choix des pondérations. Ce choix pourrait être enrichi par confrontation entre différents experts et éventuellement par des mécanismes d'apprentissage de type "réseaux de neurones" sur tout l'historique des activités similaires. Enfin, l'étape de caractérisation n'étant pas une fin en soi, l'amélioration de la démarche passe par son intégration dans un système plus global de pilotage des compétences, en particulier pour une problématique d'affectation.

## Affectation des tâches aux acteurs basée sur un historique des situations

Dans le Tableau 29 issu de [Ch3], nous proposons une comparaison entre les concepts manipulés en Raisonnement à Partir de Cas (RàPC<sup>81</sup>) [Aamodt et Plaza, 1994] et les concepts cognitifs qui sont à la base de nos travaux sur la modélisation d'une compétence. Le RàPC a été développé à partir des théories des scripts et des frames. Ces concepts sont relativement proches de celui de schème. Le schème et le frame supportent une structure cognitive pour l'action et sont modifiables, évolutifs. Ce ne sont pas des stéréotypes. Nous pensons qu'en raison de ces correspondances fortes, le RàPC apparaît comme une méthodologie bien adaptée pour supporter le retour d'expérience [Renaud *et al.*, 2007], la modélisation des compétences et l'affectation de tâches à des acteurs.

Récemment, Mille [2006] a proposé un modèle de réutilisation de l'expérience à partir de traces laissées par l'utilisateur lors d'utilisations antérieures. Les traces d'utilisation sont considérées comme des sources de connaissances expérimentales et sont exploitables pour une assistance à l'utilisateur. Ces techniques nouvelles de traçabilité, couplées au RàPC, semblent particulièrement intéressantes pour la construction d'un référentiel de compétences, issu de la traçabilité des situations de travail et constituant une "base de cas".

La réalisation d'une mission dans une situation donnée pourrait être modélisée comme un cas avec sa solution spécifique. Une compétence est alors une abstraction d'une classe de missions similaires avec une solution générique comportant des invariants sur cette classe. Une mission nouvelle peut être considérée comme un problème cible. En RàPC, la remémoration qui a lieu dans l'espace des problèmes consiste à identifier la classe de cas (ici, missions réalisées) la plus proche ou qui permettra une adaptation facile dans l'espace des solutions. Pour l'appariement, des techniques de *clustering* sont utilisées (couramment, la méthode des k plus proches voisins). Une classe de cas définit un ensemble de cas qui sont résolus de la même façon, c'est-à-dire les cas se

---

<sup>81</sup> En Anglais, Case-Based Reasoning (CBR)

résolvant avec les mêmes connaissances d'adaptation. Les problèmes d'adaptation et d'apprentissage sont particulièrement difficiles en RàPC et sont dépendants de l'application [Fuchs *et al.*, 2006]. Leur étude dans le cas de l'affectation pourrait être un challenge intéressant.

Concepts du CBR	Concepts cognitifs	Utilité pour l'affectation
Cas, problème	Situation, mission	
Frame, script, schéma	Schème	
Cycle du CBR	Processus d'activation et adaptation des schèmes	
Base de cas	Réseaux de schèmes et de classe de situations	
Traces de raisonnement	Plans d'action et règles (d'enchaînement, de conduite, d'adaptation, d'évaluation, ...)	
Elaborer	Identifier la situation avec recherche dans le répertoire de schème	Formaliser une mission nouvelle
Se remémorer (identifier une classe de cas proche avec critère de similarité, critère d'adaptabilité)	Activation d'un schème	Identifier une classe de missions réalisées proche (c'est-à-dire la compétence concernée)
Réutiliser (adapter, contrôler la cohérence solution du cas source / solution du problème cible)	Instancier les variables de la situation, utiliser les connaissances pour inférer, anticiper et construire un plan d'action	Analyser l'écart entre la mission nouvelle et la compétence acquise ; construire un plan d'action
Réviser (traiter les exceptions, anticiper des échecs potentiels)	Passer à l'acte, comparaison entre situations prévue et réelle, vérifier la validité du plan d'action, détecter une situation d'échec	Calculer une probabilité de succès (ou de confiance)
Mémoriser (apprendre, stocker le cas)	Assimiler, accommoder, enrichissement d'une classe de situations	Enregistrer les nouvelles connaissances d'adaptation, faire évoluer les classes de missions (c'est-à-dire, de cas)

**Tableau 29 : Correspondance entre concepts du CBR et concepts cognitifs**

### **Affectation multi-périodes avec évolution des compétences**

Il s'agit d'une extension des travaux présentés dans la section 7.4 (p.134). Nous avons souligné que le critère correspondant à la formulation d'objectif de développement de compétences nécessite un approfondissement. Pour cela, nous devons introduire une modélisation multi-périodes pour représenter le fait qu'au cours de la réalisation d'une tâche à la période P, l'acteur développe la compétence correspondante et donc à un niveau de performance plus élevé, pour cette compétence, au début de la période P+1. Inversement, le fait de ne pas réaliser une tâche

dégrade progressivement le niveau de performance de l'acteur (oubli de connaissances ou accroissement des exigences sur la tâche).

Nous supposons que la planification des tâches a été réalisée et que le problème revient à choisir les meilleures affectations de tâches à des acteurs pour minimiser le coût global sur l'horizon d'affectation ( $N$  périodes). Le développement de compétences pourra être modélisé comme un second critère d'optimisation ou comme une contrainte à respecter.

Cette perspective devrait être traitée dans le travail de doctorat de O. Hlaouittun.

### **Spécialistes vs. généralistes**

Une question délicate pour un architecte système est de savoir si, pour améliorer les performances du projet, il est préférable de choisir des experts d'un domaine technologique ou des ingénieurs généralistes capables d'étudier le système dans plusieurs domaines technologiques. Pour le Directeur d'un Métier, cette question revient à considérer les parcours professionnels et les fonctions instituées dans le Métier : quel ensemble de tâches peut-on confier à un seul individu ?

Les travaux portant sur la constitution d'équipe n'abordent pas cette question à notre connaissance. Au niveau scientifique, il s'agit de modéliser des fonctions (ou rôles) qui peuvent être multi-compétences et multi-niveaux de performance pour une compétence donnée. Il faut aussi relier la compétence requise aux niveaux de performance requis par les exigences du système à concevoir. Pour cela, les travaux de [Zakarian et Kusiak 1999] peuvent nous fournir une aide. Cependant, d'autres aspects doivent être modélisés, en particulier, les concepts de "capacité cognitive" et de "proximité entre tâches". Chaque tâche requiert une certaine capacité cognitive et une certaine durée. Chaque individu a une capacité cognitive limitée et un temps de travail limité. Nous pouvons admettre un principe d'iso-complexité des fonctions : le meilleur des experts d'un domaine a une capacité semblable au meilleur généraliste. Par ailleurs, il faut disposer d'une distance entre tâches pour décider s'il est préférable de les regrouper et de les affecter à un seul individu afin de minimiser les efforts de coopération nécessaires. Pour estimer les coûts de coopération, il est souvent admis que les généralistes ont plus de facilité à coopérer que les spécialistes. L'objectif de ce travail est alors de formuler un problème d'optimisation dont le but est de créer des clusters de tâches qui pourront servir de base pour le développement de futures fonctions.

### **Optimisation des processus sous contrainte de compétences**

Jusqu'à présent, les travaux portant sur l'optimisation des processus au moyen des DSM processus proposent des regroupements de tâches en fonction de leur dépendance temporelle (séquentialité) et de la probabilité de devoir itérer entre deux tâches (évaluation numérique du degré de dépendance entre deux tâches, valeur comprise entre 0 et 1) [Browning, 1998]. Ces valeurs sont estimées en tenant compte uniquement de la nature des tâches. Un raffinement de cette méthode est envisageable en tenant compte des compétences des acteurs affectés à la réalisation des tâches. En effet, selon le niveau de compétences des acteurs concernés, les probabilités d'itération peuvent changer. Concrètement, ce problème est à relier avec un constat : au début des projets afin de minimiser les risques de mauvaises décisions (et donc d'augmenter les risques d'itérations), certaines entreprises préfèrent affecter des experts sur le projet et ensuite, pour des tâches d'affinement du travail, elles affectent des ingénieurs moins expérimentés. Il y a donc bien une relation à modéliser entre la probabilité d'itération et le niveau de compétence de l'individu concerné. Le but est de rechercher et de simuler le partitionnement des tâches qui réduit la durée totale du processus modélisé, en tenant compte d'un choix d'affectation d'une tâche à un acteur. Ce travail peut permettre de simuler les risques de dépassement de délai ou de coût sur un projet, selon les scénarios d'affectation envisagés.



## Partie VI. Résultats récents et perspectives

La partie VI est composée du Chapitre 8 et du Chapitre 9.

Dans le Chapitre 8, nous présentons deux contributions récentes portant sur le couplage des architectures du produit et du projet :

- Une méthode de propagation de modifications entre l'architecture du produit et l'organisation du projet de conception (thèse de G. Harmel [Th.3] ; utilisation d'une modélisation matricielle, d'un traitement flou et d'une modélisation d'incertitudes ; application sur un projet de conception d'une boîte de vitesse robotisée au sein de PSA/DPMO ; valorisation par un article [R.7]).
- Une méthode d'optimisation du couplage entre les architectures de deux domaines liées par une matrice d'incidence (utilisation de techniques d'optimisation et de la toolbox d'optimisation de Matlab ; application dans le cas du couplage produit / projet et dans le cas du couplage fonctions / organes, à partir des données collectées au sein de PSA/DPMO ; travail pas encore publié).

Dans le Chapitre 9, nous présentons des perspectives de recherche qui prolongent ces résultats récents sur des horizons de court terme à long terme.

## Chapitre 8. Vers le couplage entre l'architecture du produit et l'organisation du projet

### 8.1. Introduction

La conception d'un système complexe peut être facilitée par la conception appropriée de son architecture. L'IS nous permet d'élargir l'objectif de pilotage du projet de conception, du système-produit vers le système-projet dans sa globalité. De la même manière qu'une identification appropriée de l'architecture du produit est un préalable à une conception détaillée satisfaisante, une conception appropriée de l'organisation du projet est un préalable à une conduite efficace du projet.

Nous situons nos travaux dans les phases amont de la conception (conception de principe, conception d'ensemble [Pahl *et al.*, 1996]) qui précèdent la définition détaillée et l'industrialisation du produit (au sein de PSA Peugeot Citroën, le choix de l'architecture d'ensemble d'un système est réalisé lors du premier rang des exigences, c'est-à-dire en avance de phase programmée. Cette architecture est approfondie lors de la conception préliminaire qui déclenche la définition détaillée des constituants). Par la suite, il s'agit de structurer au mieux les équipes de concepteurs qui vont travailler sur la spécification et définition détaillée des constituants du système.

Nous pouvons distinguer deux types de situation de conception selon le niveau de remise en cause de l'architecture du système et de l'organisation du projet.

Dans une situation de re-conception, l'architecture du produit peut subir des modifications locales, par exemple, par le remplacement de modules par un autre module, devant permettre l'obtention de nouvelles performances. Dans ce cas, l'organisation du projet précédent peut être partiellement reconduite. L'architecte a alors besoin d'outils lui permettant de propager des modifications d'un domaine sur l'autre pour simuler les conséquences de ses choix et simuler les conséquences sur l'architecture finale. Il peut s'agir aussi de justifier la cohérence de l'organisation de projet retenue. Pour répondre à ce besoin, nous avons proposé une première contribution qui est une méthode de co-évolution des architectures de deux domaines couplés (section 8.1).

Dans une situation de conception innovante, l'architecte va devoir construire une architecture du produit et faire des choix d'affectation de tâches de conception à certains acteurs. Le problème est que bien souvent, il ne peut pas anticiper l'impact de ses choix concernant l'architecture du produit sur les efforts de coordination qui seront nécessaires entre les équipes. Nous avons proposé une seconde contribution concernant l'optimisation de l'architecture d'une DSM-acteur, ayant comme données une DSM-produit et une matrice d'incidence produit-acteur (section 8.2).

Un état de l'art sur les couplages entre les architectures du produit et de l'organisation a déjà été présenté dans la section 6.4 concernant la conception de l'organisation d'un projet et dans la section 4.3.5 concernant l'intérêt des matrices d'incidence. Notons que certaines références sont très récentes et montrent que cette thématique présente un regain d'intérêts pour des chercheurs américains et allemands, en raison de l'enjeu que ce thème revêt pour les performances globales du projet et du produit<sup>82</sup>. Souvent, ils proposent aussi l'utilisation de matrices de couplage de domaines<sup>83</sup>. Mais, à notre connaissance, aucun travail ne développe actuellement une méthode formelle permettant de propager les contraintes d'un domaine sur un autre ou de les faire co-évoluer.

---

<sup>82</sup> Les applications industrielles sont en collaboration avec des groupes comme BMW, Ferrari, Daimler Chrysler, Audi, Rols Royce, Volvo, Robert Bosch GmbH.

<sup>83</sup> DMM: Domain Mapping Matrix ou MDM: Multiple Domain Matrix

## 8.2. Une méthode de co-évolution entre l'architecture du produit et l'organisation du projet de conception

Nous résumons dans cette section le principe de la méthode développée. L'Annexe 6 reproduit un article [R.7] la décrivant plus amplement.

Nous faisons l'hypothèse que pour toute fonction ou composant du produit, il existe une tâche de conception qui porte sur la définition de cet élément du produit. Les domaines du produit et des processus sont alors bijectifs. Nous sommes conscients que nous ne modélisons pas l'organisation du projet dans sa globalité. Nous nous limitons à la modélisation de l'architecture organique du système-projet par l'utilisation d'une DSM-Acteurs. De cette façon, nous devons traiter uniquement deux DSM statiques. La DSM-Acteurs est alors couplée à la DSM produit par une matrice d'incidence MI Produit Acteurs.

L'objectif de la méthode proposée est de propager des modifications réalisées sur deux domaines couplés afin d'assurer une co-évolution cohérente de ces deux domaines. Son originalité provient d'une part, de l'utilisation d'une typologie des incertitudes qui représente les changements introduits et qui peut être modélisée à l'aide d'une matrice DSM, d'autre part, de la formalisation de la propagation des modifications en nous basant sur la méthode présentée au Chapitre 5, section 5.3 (propagation des choix d'architecture d'un domaine sur l'architecture d'un autre domaine).

### 8.2.1. Qualités attendues

Les qualités attendues (ou exigences) de la méthode sont les suivantes :

- E1 : Permettre la modélisation de modifications dans les deux domaines.
- E2 : Propager les modifications d'un domaine vers un autre.
- E3 : Permettre l'identification d'une architecture dans chaque domaine simulé, qui soit interprétable par un expert.

Pour tester cette méthode, nous l'avons appliquée sur un cas industriel portant sur l'évolution d'une Boîte de Vitesse (BV) manuelle vers une BV robotisée (évolution conjointe des architectures du système et de l'organisation du projet).

### 8.2.2. Structure générale de la méthode

Nous entendons développer et mettre en œuvre une méthode de propagation entre les architectures de deux domaines A et B couplés à travers une matrice d'incidence  $MI(A,B)$ . Cette propagation est modélisée comme l'évolution d'une situation initiale (caractérisée par  $DSM(A_0)$ ,  $DSM(B_0)$  et la matrice d'incidence  $MI(A_0,B_0)$ ) vers une situation finale (caractérisée par  $DSM(A_f)$ ,  $DSM(B_f)$  et la matrice d'incidence  $MI(A_f, B_f)$ ). La transition d'une situation initiale stable vers une situation finale stable nécessite le passage par plusieurs étapes intermédiaires où les incertitudes sont introduites progressivement puis propagées. La méthode de propagation que nous proposons est structurée comme suit (Figure 49) :

1. Modéliser la situation initiale :
  - Construire les  $DSM(A_0)$  et  $DSM(B_0)$  et la matrice d'incidence  $MI(A_0,B_0)$
  - Vérifier et réaliser la cohérence de la situation initiale
2. Explorer les incertitudes introduites par l'évolution de la situation initiale : construction d'une situation intermédiaire  $DSM(A_i)$ ,  $DSM(B_i)$  et  $MI(A_i,B_i)$ .
3. Simuler, à partir de la situation intermédiaire, les DSM ( $A_c$ ) et DSM ( $B_c$ ) co-évoluées avec la méthode de coévolution.

4. Construire les architectures finales, si l'utilisateur le juge nécessaire, en combinant les matrices précédentes avec les architectures intermédiaires, selon l'équation :

$$DSM(A_f) = \alpha.DSM(A_c) + \beta.DSM(A_i) \text{ avec } \alpha + \beta = 1$$

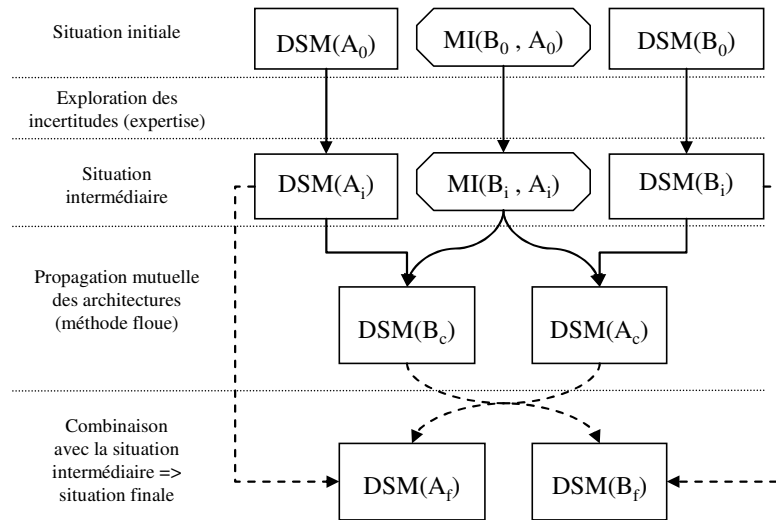


Figure 49 : Structure de la méthode de coévolution des architectures

### 8.2.3. Application : conception d'une nouvelle boîte de vitesse robotisée

Pour mettre en œuvre la méthode de coévolution que nous proposons, nous avons travaillé sur la situation de conception d'une Boîte de Vitesse (BV).

La boîte de vitesse en question est une BV manuelle mécanique. Le constructeur automobile a décidé de lancer un projet de reconception de cette BV pour proposer une BV robotisée.

Une BV robotisée est une boîte de vitesse manuelle qui agit comme une BV automatique à travers l'incorporation d'un actionneur réalisant automatiquement, selon un schéma de commande prédéfini, les changements de vitesse. Ce projet est réellement un projet de reconception étant donné que le projet n'est pas parti de la feuille blanche mais de la BV manuelle pour réaliser les adaptations nécessaires. Le Tableau 30 présente les notations utilisées par la suite pour illustrer la méthode de co-évolution.

<b>FS VOL</b>	Fonction Système Volumes fonctionnels	<b>PAM</b>	Pilote Architecture Mécanique
<b>FS TPU</b>	Fonction Système Transmission de Puissance	<b>PMIV</b>	Pilote Intégration et Validation
<b>FS ELU</b>	Fonction Système reprise d'Effort et Lubrification	<b>AF</b>	Architecte fonctionnel
<b>FS COU</b>	Fonction Système Couplage	<b>CdP</b>	Chargé de projet Composant
<b>FS COM</b>	Fonction Système Commutation		
<b>CDI</b>	Commande Interne		
<b>SYN</b>	Synchroniseur		
<b>TRI</b>	Tringlerie		
<b>PE</b>	Pédale d'Embrayage		
<b>EMB</b>	Embrayage		
<b>CIE</b>	Commande Interne d'Embrayage		
<b>DIFF</b>	Différentiel		
<b>MEI</b>	Mécanique Interne		
<b>CART</b>	Carter		
<b>ACT</b>	Actionneur		

Tableau 30 : Notations concernant le projet de conception d'une boîte de vitesse robotisée

Dans l'application, les notations du schéma de la Figure 49 sont remplacées ainsi : A devient P (domaine du Produit) et B devient A (domaine des Acteurs).



## Architecture coévoluee du produit

Nous avons appliqué la méthode, pas à pas, pour identifier l'architecture finale de la boîte de vitesse robotisée (Figure 50). Nous analysons cette architecture de la manière suivante :

- L'architecture obtenue de la  $DSM(P_f)$  est différente de celle obtenue dans  $DSM(P_c)$ . Ce qui signifie qu'il y avait bien une différence entre l'architecture perçue directement par les acteurs et celle obtenue par propagation de l'architecture de l'équipe de conception.
- La différence principale que nous obtenons avec  $DSM(P_f)$  est que l'actionneur n'est plus intégrateur sur tout le produit mais seulement entre les modules fonctionnels "couplage" et "commutation". L'actionneur est identifié comme jouant un rôle pivot entre le module de commutation et celui de couplage, ce qui reflète bien sa double mission, à savoir, commander à la fois le changement de vitesse et l'embrayage.

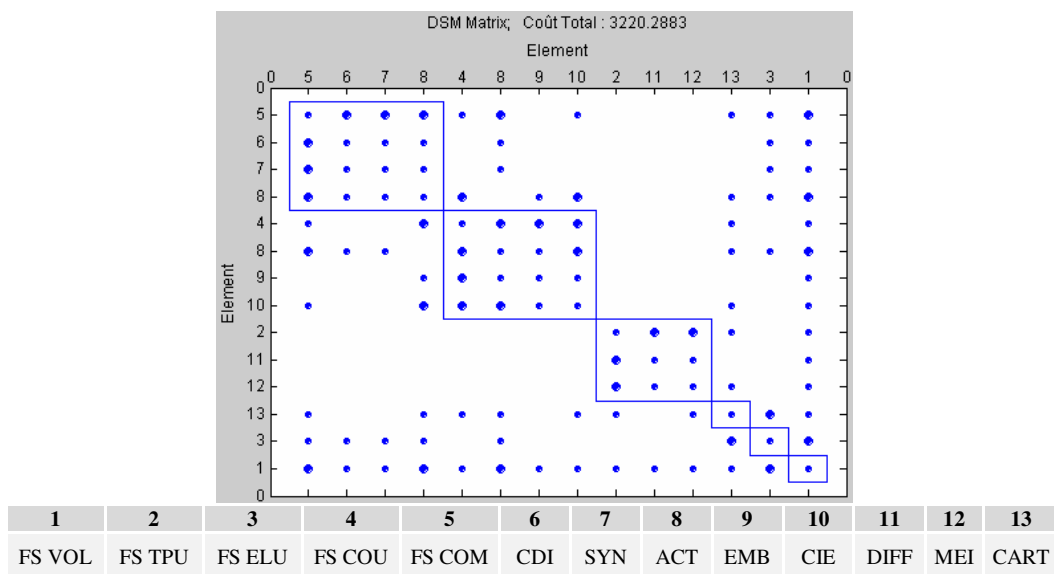


Figure 50 : Architecture finale du produit, après *clustering* de la  $DSM(P_f)$

## Architecture coévoluee des acteurs du projet

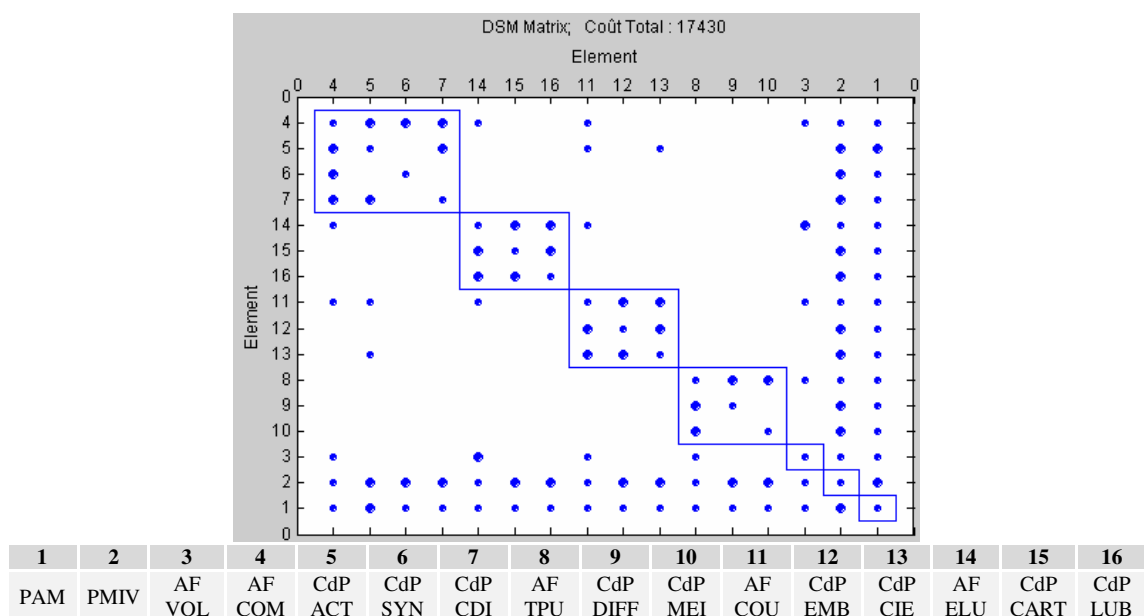


Figure 51 : Architecture finale de la DSM Acteur, après *clustering*

En comparant l'architecture coévoluée (Figure 51) et l'architecture initiale, nous remarquons qu'elles sont semblables. Ainsi, en proposant aux acteurs du projet d'arbitrer entre les différentes architectures obtenues, la réponse reçue est que même si les interfaces de certains composants sont modifiées, cela influe peu sur l'organisation des équipes mais cela engendre plus de négociations et plus de collaboration en amont entre les architectes fonctions systèmes (AF) et l'architecte système, responsable du projet (dénommé PAM, Pilote Architecte Mécanique).

Il est intéressant de constater qu'une modification dans l'architecture physique du produit sans remise en question de son architecture fonctionnelle, n'est pas suffisante pour perturber la robustesse de l'organisation des acteurs de conception. En réalité, les acteurs sont structurés fortement autour des fonctions systèmes du produit et au sein d'une équipe, ils sont liés par des connaissances et des compétences communes portant sur chaque fonction. Ce sont ces compétences qui donnent son identité à chaque module d'acteurs (acteur collectif).

#### **8.2.4. Éléments de validation et synthèse**

Cette méthode a été testée à partir des données recueillies lors de nombreux entretiens avec des architectes et ingénieurs qui ont travaillé sur la BV robotisée. Les premiers résultats obtenus montrent son intérêt dans l'aide à la formalisation et à la propagation d'évolution d'architecture d'un domaine vers un autre. Les trois exigences définies ont été satisfaites.

Une autre application est certainement nécessaire pour confirmer son efficacité.

### **8.3. *Une méthode d'optimisation de l'organisation de la conception***

Nous nous plaçons en situation de conception innovante ou routinière. Nous faisons deux hypothèses :

- l'architecte a établi une première version d'architecture du produit qui sera, dans la suite du projet, affinée mais qui va servir de référence. Il a donc construit une DSM produit, notée DSM(P).
- l'architecte a déterminé une liste de concepteurs qu'il va retenir pour travailler sur le projet de développement du produit et il a construit une matrice d'allocation de la conception des composants ou fonctions du produit aux différents concepteurs, notée MI (pour matrice d'incidence).

Nous proposons de développer une méthode d'optimisation de l'architecture de l'organisation des concepteurs.

#### **8.3.1. Qualités attendues**

Les qualités attendues de la méthode sont les suivantes :

- Minimiser les besoins d'interactions entre les acteurs dans le projet de conception,
- Garantir que les interfaces entre les composants du produit seront bien étudiées grâce à des interactions appropriées entre les acteurs du projet.

Le but est de déterminer une DSM-Acteurs, notée DSM(A), qui répondent à deux critères :

- Elle contient le plus de zéro possible, ce qui signifie que les efforts de communication et coordination seront minimisés sur le projet,
- Elle permet de couvrir la conception de chaque interaction du produit, représentée dans DSM(P).

Les données d'entrée (Figure 52) sont la matrice d'incidence, qui modélise les choix d'affectation des éléments du produit aux différents acteurs, et la matrice DSM produit.

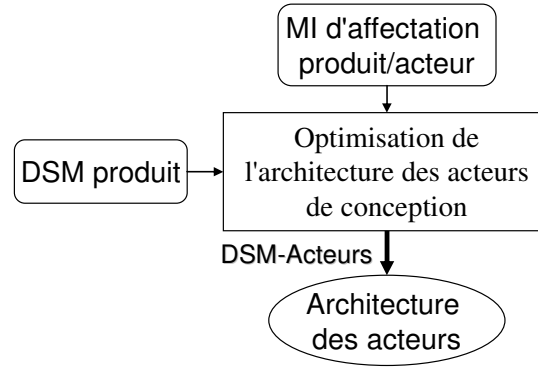


Figure 52 : Optimisation de l'architecture des acteurs de conception

### 8.3.2. Formule matricielle de propagation

Suite à la thèse de G. Harmel, en étudiant la forme des relations que nous avons retenues pour propager des contraintes d'un espace A sur un autre espace B, nous avons constaté que, sous l'hypothèse d'une contribution linéaire de chaque interaction et en considérant une extension de la DSM où chaque valeur sur la diagonale est égale à 1, alors la valeur obtenue par propagation peut être estimée par la relation suivante :

$$\sum_i \sum_j [MI(A_i, B_u) \times DSM(A_i, A_j) \times MI(A_j, B_v)]$$

qui s'exprime sous forme matricielle :  $MI(A, B) \times DSM(A) \times MI'(A, B)$

avec  $MI'$ , la transposée de la matrice  $MI$ .

Cependant, la matrice résultante n'est pas forcément normalisée entre [0 , 1]. Pour obtenir la normalisation, nous introduisons alors un coefficient de normalisation  $c$ . Nous appelons  $DSM_{sim}(B)$  la matrice obtenue par la formule de propagation suivante :

$$DSM_{sim}(B) = \frac{MI(A, B) \times DSM(A) \times MI'(A, B)}{c}$$

### 8.3.3. Formulation d'un problème d'optimisation de l'architecture des acteurs

Nous allons présenter une formulation de ce problème et une méthode de résolution. Ce travail a été réalisé en collaboration avec S. Chrétien, maître de conférences en mathématiques à l'Université de Franche-Comté.

En considérant la propagation des choix d'architecture des acteurs vers celui du produit, la formule de propagation précédente s'écrit :

$$DSM_{sim}(P) = \frac{MI \times DSM(A) \times MI'}{\beta}$$

Le paramètre  $\beta$  est utilisé comme paramètre de normalisation de  $DSM_{sim}(P)$ .

Afin de maximiser le nombre de 0 de la matrice  $DSM(A)$  tout en conservant une proximité de  $DSM_{sim}(P)$  avec la matrice  $DSM(P)$  donnée, nous avons créé la "fonction objectif" suivante :

$$\min \left( \left( \sum_i \sum_j (\mathbf{DSM}(\mathbf{P})_{i,j} - \mathbf{DSM}_{\text{sim}}(\mathbf{P})_{i,j})^2 \right) + \lambda \times \sum_i \sum_j \mathbf{DSM}(\mathbf{A})_{i,j} \right)$$

$$\text{Sous les contraintes : } \begin{cases} \mathbf{DSM}(\mathbf{A})_{i,i} = 0, \forall i = 1..d & (1) \\ 0 \leq \mathbf{DSM}(\mathbf{A})_{i,j} \leq 1 \forall i, j = 1..d & (2) \\ \mathbf{DSM}_{\text{sim}}(\mathbf{P}) \geq \mathbf{DSM}(\mathbf{P}) & (3) \end{cases}$$

Les contraintes (1) et (2) imposent respectivement que les valeurs sur la diagonale de  $\mathbf{DSM}(\mathbf{A})$  soient nulles et que les autres valeurs soient comprises en 0 et 1.

La contrainte (3) impose que la valeur simulée soit toujours plus forte que la valeur initiale afin de ne pas perdre d'interactions entre les composants du produit ou ne pas en minimiser la valeur. Dit autrement, nous voulons que les interactions entre les concepteurs (c'est-à-dire,  $\mathbf{DSM}(\mathbf{A})$ ) et leurs rôles respectifs (c'est-à-dire,  $\mathbf{MI}$ ) permettent de couvrir l'ensemble des interactions du produit.

La première partie de la fonction objectif correspond à un "critère de complétude" qui a pour but de minimiser la différence, terme à terme, entre  $\mathbf{DSM}(\mathbf{P})$  et  $\mathbf{DSM}_{\text{sim}}(\mathbf{P})$ . Il s'agit de s'assurer que chaque interface dans le produit sera complètement définie.

La seconde partie de la fonction objectif vise à minimiser le nombre d'interactions entre les acteurs du projet, c'est-à-dire à réduire le coût des interactions. Choisir directement le nombre d'interactions non nulles comme critère aurait introduit un critère non convexe, appartenant même à la classe des problèmes dits NP-complets, pour lesquels la résolution du problème est a priori très complexe. Nous avons donc cherché à utiliser un autre critère.

Or, de récentes études ont été menées par des mathématiciens qui se sont intéressés au problème de maximiser le nombre de zéro d'un vecteur (ou d'une matrice) à reconstruire à partir d'un petit nombre d'observations, lorsqu'on sait que ce vecteur est parcimonieux (il contient de nombreux zéros). Cette thématique est dénommée "compressive sampling" [Candès, 2006]. L'approche maintenant classique est de remplacer une pénalisation de type "norme 0" (notée  $l_0$ ), qui compte le nombre de composantes non nulles dans le vecteur, par une pénalisation de type "norme 1" (notée  $l_1$ ), qui consiste en la somme des valeurs absolues des composantes du vecteur et qui présente, cette fois, l'avantage d'être convexe. Candès et Tao [2005] ont démontré qu'alors, sous certaines conditions (en particulier, vecteur de grande taille), remplacer la norme  $l_0$  par la norme  $l_1$  impose le même support sur le vecteur à retrouver, c'est-à-dire que les composantes imposées comme nulles sont les mêmes.

Même si notre problème n'est pas d'aussi grande taille que dans le cas de traitement d'images, nous avons appliqué ce théorème (hypothèse qu'il faudra vérifier), et ainsi créé le second critère d'optimisation qui est convexe, avec le paramètre  $\lambda$  comme paramètre d'homogénéisation.

En raison du premier critère, nous avons ainsi construit un problème de type programmation quadratique. Nous avons alors transformé la formulation du problème pour le rendre sous la forme matricielle suivante :

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathfrak{R}^n} (0.5 * \mathbf{x}' * \mathbf{H} * \mathbf{x} + \mathbf{f}' * \mathbf{x}) \quad \text{sous la contrainte : } \mathbf{A} * \mathbf{x} \leq \mathbf{B}$$

où  $\mathbf{x}$  est un vecteur colonne correspondant à la concaténation des colonnes de la matrice  $\mathbf{DSM}(\mathbf{A})$ .

Nous avons démontré que, dans le cas présent,  $\mathbf{H}$  est une matrice définie positive stricte, ce qui nous permet de conclure à l'unicité de la solution à ce problème. Par ailleurs, la fonction coût et les

contraintes étant convexes, nous avons utilisé le solveur de programmation quadratique convexe que propose la toolbox d'optimisation de Matlab (fonction Quadprog).

### 8.3.4. Détermination des paramètres $\lambda$ et $\beta$

Nous pouvons démontrer facilement deux théorèmes qui permettent de fixer des valeurs pour  $\lambda$  et  $\beta$  de façon appropriée :

- En augmentant  $\beta$  à  $\lambda$  fixé, le nombre et l'amplitude des valeurs non nulles de  $DSM(A)$  augmentent ;
- Lorsque  $\lambda$  augmente à  $\beta$  fixé, la densité de la matrice  $DSM(A)$  diminue.

### 8.3.5. Application à l'optimisation de l'architecture des acteurs

Nous avons testé cette formulation de problème sur l'exemple de la boîte de vitesse robotisée.

Nous avons d'abord fixé  $\lambda = 1$ , et nous avons trouvé une valeur appropriée pour  $\beta$ ,  $\beta = 8$ . Nous obtenons comme une  $DSM_{opt}(A)_{(\lambda=1)}$  d'une densité de 36% (Figure 53- coté gauche).

Nous avons ensuite augmenté la valeur de  $\lambda$  de façon à favoriser le second critère. Nous avons fixé  $\lambda = 50$  pour obtenir une densité de 33%, et nous obtenons l'architecture de  $DSM_{opt}(A)_{(\lambda=50)}$  (Figure 53- coté droit).

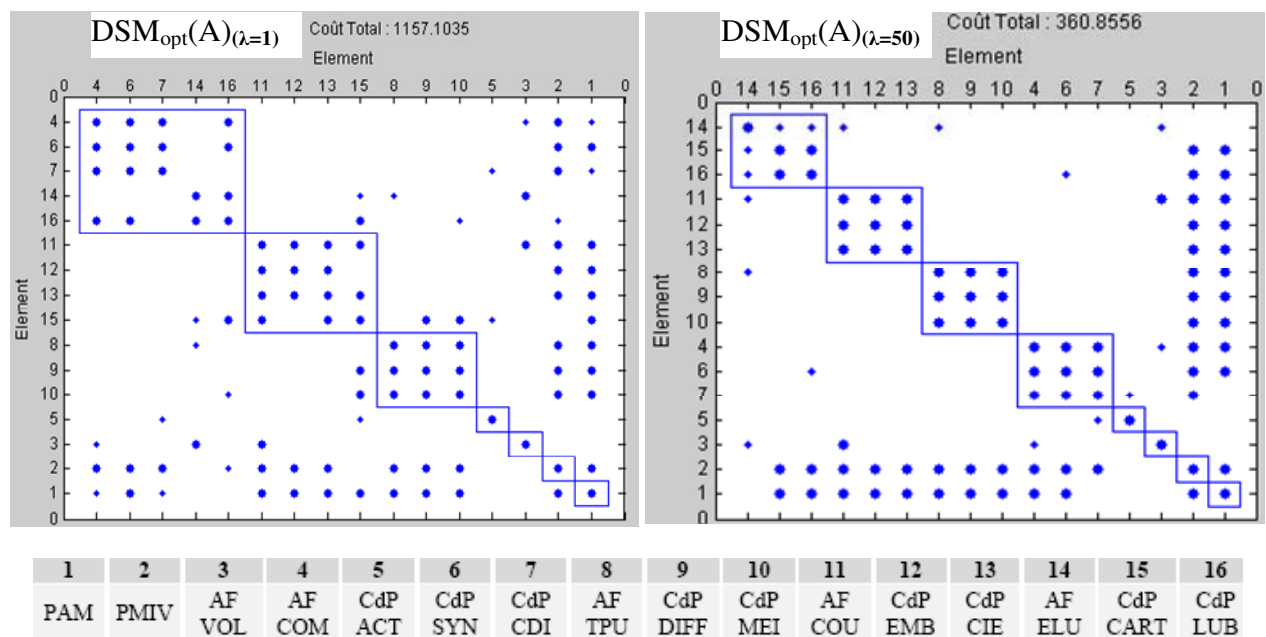


Figure 53 : Architecture des acteurs après *clustering* des  $DSM_{opt}(A)_{(\lambda)}$

En comparant les deux architectures, nous notons que la principale différence provient de la position de l'acteur 15 (Chargé de projet du Carter) et la faible sensibilité de l'algorithme à l'augmentation de  $\lambda$ . L'intérêt de la seconde solution est de proposer des modules de plus petite taille et mieux découplés. Nous constatons que, pour la  $DSM_{opt}(A)_{(\lambda=50)}$ , la solution optimale est obtenue en désignant l'acteur 5 (chargé de projet de l'actionneur) comme un acteur isolé, couplé avec l'acteur 7 (chargé de projet Commande Interne). Cependant, dans la réalité, il paraît intéressant de l'affecter dans le module composé de 4, 6 et 7. Nous retrouvons le rôle intégrateur des acteurs 1 et 2, qui sont en interaction avec un grand nombre de concepteurs. Les interactions de l'acteur 3 (Architecte fonctionnel Volumes) avec d'autres architectes fonctionnels (acteurs 4, 11, 14) sont cohérentes.

### 8.3.6. Éléments de validation et synthèse

Cette architecture est satisfaisante par rapport à la réalité et correspond à l'architecture obtenue par le processus flou. De plus, la densité est passée de 52% dans le cas de l'utilisation du processus flou à une densité de 33%, ce qui fait un gain de 35% sur le nombre d'interactions.

Nous avons enfin vérifié que la matrice  $DSM_{sim}(P)$  restait cohérente avec la réalité et avec les résultats obtenus par le processus flou (Figure 54). Il apparaît que l'architecture de cette matrice simulée est identique à la matrice  $DSM(P)$  construite par l'architecte et que les valeurs sont proches (dispersion faible). Nous pouvons donc garantir que l'architecture optimale des acteurs doit permettre d'explorer totalement les interactions entre les composants. Cette vérification nous permet de confirmer l'hypothèse concernant le second critère d'optimisation.

Enfin, nous avons testé notre méthode sur un second jeu de données provenant de la conception d'un nouveau moteur diesel. Nous disposons de la matrice Fonction\_Systèmes (FS) et de la Matrice d'incidence FS-Comp. Nous avons alors calculé l'architecture optimale des composants  $DSM_{opt}(Comp)$ . En fixant les paramètres  $\beta = 8$  et  $\lambda = 40$ , nous avons trouvé un résultat semblable à celui qui avait été trouvé avec notre méthode floue, mais en réduisant aussi le nombre d'interactions (gain de 21%).

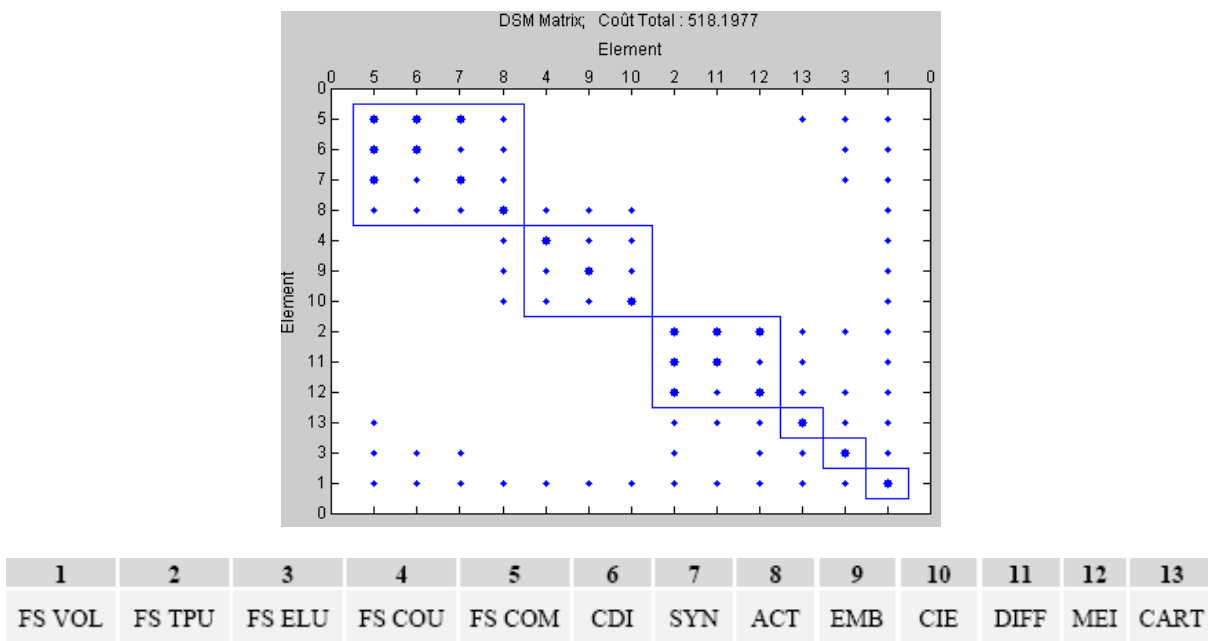


Figure 54 : Architecture du produit après *clustering* de  $DSM_{sim}(P)_{(\lambda=50)}$

En synthèse, nous présentons dans le Tableau 31 une estimation qualitative des exigences que doit satisfaire la méthode.

Des travaux ultérieurs seront nécessaires pour tester la méthode sur d'autres applications, en particulier, sur des architectures intégrales où les matrices ont de fortes densités, supérieures à 70%. Une analyse de sensibilité devra être réalisée pour vérifier la robustesse de la solution aux imprécisions sur les valeurs des matrices en entrée.

Exigences	Estimation qualitative	Risques	Levée de risque
E1 : Minimiser les besoins d'interactions entre les acteurs dans le projet	++	Influence de la densité des matrices en entrée,	Tester la méthode sur des matrices denses (architectures intégrales)
E2 : Garantir que les interfaces entre les composants du produit seront bien étudiées	++	Sensibilité de la méthode	Réaliser une analyse de sensibilité

Tableau 31 : Estimation qualitative de l'optimisation de l'architecture des acteurs

## 8.4. Synthèse

Nous avons présenté dans ce chapitre deux résultats récents permettant de propager ou d'optimiser les couplages entre deux domaines couplés.

Nous avons appliqué la méthode de propagation dans le cas d'un projet de conception d'une nouvelle boîte de vitesse robotisée. Il apparaît que le produit étant modulaire, l'organisation mise en place peut aussi être modulaire, chaque module étant centrée sur une fonction système et les constituants correspondants. Une modification dans l'architecture physique du produit n'a alors pas ou peu d'impact sur l'architecture des acteurs du projet qui s'avère alors robuste.

Il est certain que d'autres applications devraient être réalisées afin de confirmer l'intérêt de cette méthode, quand il s'agit de tester la robustesse d'une organisation face à des modifications dans l'espace du produit.

Dans la seconde contribution, nous avons présenté une méthode permettant l'optimisation de la matrice des acteurs connaissant la matrice des composants et la matrice d'affectation produits-acteurs. Cette méthode est générique et nous l'avons appliquée aussi dans le cas de l'optimisation d'une DSM-composant connaissant une DSM-fonction et une matrice d'incidence fonction-composant. Pour les deux applications précédentes, la méthode a conduit à des résultats jugés cohérents et réduisant le nombre d'interactions dans la DSM optimisée.

Cette dernière contribution ouvre une perspective intéressante sur le couplage structurel entre deux domaines ou plus, que nous présenterons dans le chapitre de perspectives.

Contexte à l'origine	Nature de la contribution	Publications, communications
Contrat PSA/DPMO	Propagation de modifications entre l'architecture du produit et l'organisation du projet de conception	[R.7], [CI.24, 25]
	Optimisation du couplage	Non publié

Tableau 32 : Bilan quantitatif des résultats récents

## Chapitre 9. Perspectives

A la fin du Chapitre 5 (section 5.5) et à la fin du Chapitre 7 (section 7.7), nous avons proposé des perspectives propres aux deux axes majeurs de notre projet : identification de l'architecture modulaire du produit et organisation du système de conception.

Dans ce chapitre, nous réalisons d'abord une synthèse de nos contributions. Ensuite, nous développons des pistes de recherche qui s'inscrivent dans la continuité de ces travaux et sur des horizons de court à long terme. Nous les avons structurées en quatre points :

- 1) Vers une conception collaborative consciente,
- 2) Vers une performance durable du système de conception,
- 3) Vers un système agile de systèmes de conception,
- 4) Vers une ingénierie de systèmes micro-mécatroniques.

### 9.1. Synthèse des contributions

L'originalité majeure de notre projet réside dans le couplage que nous recherchons entre les architectures du système-produit, du système-projet et du système de compétences de conception. D'une part, nous avons approfondi l'architecture de chacun de ces systèmes par différentes contributions :

- pour le système-produit : un état de l'art sur l'architecture modulaire (Chapitre 4), l'amélioration d'un algorithme de *clustering*, une méthode de propagation des choix d'architecture fonctionnelle sur l'architecture des composants, ainsi que la modélisation de l'architecture d'une famille de produits (Chapitre 5),
- pour le système-projet : un état de l'art sur les méthodes formelles de structuration et d'optimisation de l'organisation d'un projet (sections 6.4 et 6.5),
- pour le système de compétences : un état de l'art (section 6.6), des modèles pour le pilotage des systèmes de compétences (section 7.2.2), une méthode de caractérisation floue d'une compétence (section 7.3), une méthode de structuration des métiers de la conception (section 7.5).

D'autre part, nous avons engagé des travaux pour coupler au moins deux de ces systèmes :

- entre le système-projet et le système de compétences : une méthode de constitution d'équipes (section 7.4),
- entre le système-produit et le système de compétences : une méthode de déploiement de prestations stratégiques sur les compétences collectives et individuelles (section 7.6),
- entre le système-produit et le système-projet : une méthode de co-évolution (section 8.2), une méthode d'optimisation (section 8.3).

Enfin, nous avons proposé un cadre de modélisation du système de pilotage conjoint de ces 3 systèmes (section 7.2.1).

Ainsi, nous avons approfondi les architectures de différents sous-systèmes du système de conception sur, dans, et avec lesquels l'architecte système mène ses activités.



## 9.2. Vers une conception collaborative "consciente"

Les contributions présentées dans ce mémoire n'ont pas concerné la capitalisation des connaissances issues des activités du projet, ni les flux d'informations en conception collaborative. Cependant, nous avons déjà mené des travaux sur ces thèmes connexes à notre problématique centrale. Ils ont été valorisés dans des revues [R.3] [R.4] et dans un chapitre d'ouvrage [Ch2]. La première piste d'approfondissement que nous décrivons ci-dessous est en partie une extension de ces travaux antérieurs.

Le système d'information et d'aide à la décision est un sous-système critique en conception qui permet de supporter des modélisations des sous-systèmes -produit et -projet ainsi que des processus de traitement et de partage de flux d'information. Ces processus sont à la fois techniques et managériaux, collaboratifs et distribués. Dans le cadre de nos analyses des activités d'architectes, nous avons mis en évidence l'importance du système d'information dans le développement d'une compétence collective (par exemple, des modèles de produit partagés mobilisant les acteurs autour d'objets communs, des modèles d'organisation du projet accessibles pour connaître les rôles et activités de chacun).

La recherche de l'information utile ou la prise de conscience du besoin d'interaction avec d'autres pour éviter ou résoudre des problèmes nécessitent que les collaborateurs puissent partager des informations portant sur l'organisation et la conduite du projet et pas seulement des informations techniques. De nombreux travaux ont été réalisés dans ce sens par des chercheurs qui tentent de développer des outils informatiques pour supporter le travail collaboratif, et plus particulièrement, la conception collaborative [Carroll *et al.*, 2006 ; Détienne, 2006 ; Zha et Du, 2006]. Les membres d'un projet ont besoin de connaître qui sont leurs collaborateurs, quels rôles ils jouent, à quels outils ils peuvent avoir accès, quels critères ils utilisent pour évaluer les résultats conjoints de la conception, comment les plans d'actions engagés évoluent au cours du temps, Etc. [Carroll *et al.*, 2006]. Cette dépendance contextuelle entre collaborateurs est souvent considérée comme étant de l'*awareness*<sup>84</sup>. Ce concept n'est pas nouveau mais prend une importance particulière dans des projets de grande taille, impliquant de multiples métiers appartenant souvent à des entreprises différentes. Cette problématique scientifique est complémentaire au challenge posé par l'intégration et l'interopérabilité des applications informatiques [Panetto, 2006].

Dans le cadre de collaborations multi-métiers pour la spécification, la conception et la justification d'un système, un challenge scientifique concerne l'intégration de multiples modèles, sur le plan technique et l'intégration des activités qui les produisent, sur le plan organisationnel.

Pour répondre à cette problématique, une première étape est l'élaboration d'une ontologie du domaine étudié : quels sont les concepts utilisés, quelles sont leurs relations, quelles sont les différences d'interprétation selon les métiers ou les entreprises concernés ? Récemment, en septembre 2007, un langage de modélisation graphique adapté à l'ingénierie de systèmes complexes, SysML, a été publié par l'*Object Management Group* [OMG, 2007]. Il fournit des entités génériques de modélisation (diagrammes) pour représenter différentes vues d'un système ainsi que des mécanismes d'allocation qui permettent aux concepteurs d'assurer la traçabilité de l'allocation des fonctions aux exigences et celle des composants aux fonctions. Cependant, la modélisation du processus de conception collaborative semble difficile avec des outils basés sur SysML. Des outils supportant les flux d'information peuvent permettre de remplir cette fonctionnalité et d'assurer le partage de l'information.

---

<sup>84</sup> Ce terme anglo-saxon n'a pas de correspondance exacte en français, selon [Schmidt, 2002] qui fournit un état de l'art sur le concept d'*awareness* dans le contexte des CSCW (Computer Supported Cooperative Work). Il peut se traduire approximativement par "le fait d'être conscient". Dourish et Bellotti [1992] définissent ainsi l'*awareness* : "an understanding of the activities of others, which provides a context for your own activity. This context is used to ensure that individual contributions are relevant to the group's activity as a whole, and to evaluate individual actions with respect to group goals and progress."

Une seconde étape est d'aider le concepteur à (se) représenter la complexité de sa situation de conception. Pour limiter la complexité des situations de conception, il faut chercher à circonscrire les interdépendances, et donc limiter les besoins d'interaction. Pour faire face à la complexité, il est possible de proposer des outils visuels de représentation des couplages et des mécanismes d'*awareness*, pour anticiper l'impact de modifications sur les modèles du système ou de l'organisation du projet.

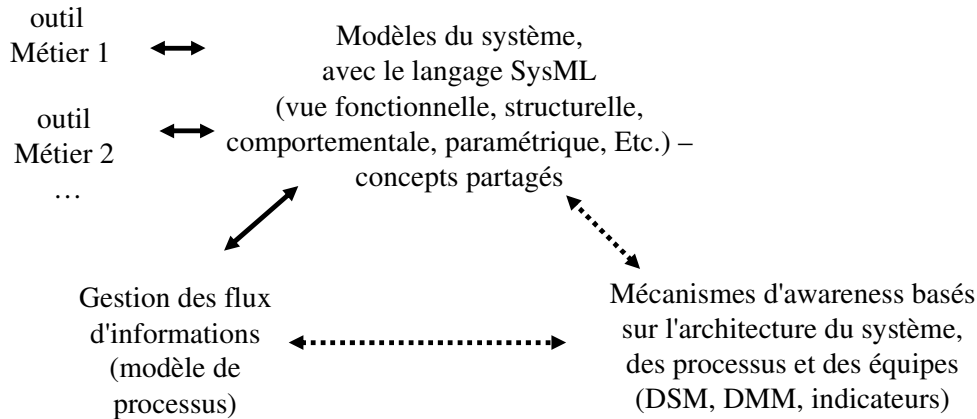


Figure 55 : Vers une conception collaborative "consciente"

Un challenge scientifique est alors de faire reposer des mécanismes d'*awareness* sur les informations partagées entre les concepteurs. Pour cela, une approche qui nous semble prometteuse est de combiner le formalisme de SysML qui permet de modéliser le système étudié avec des représentations matricielles, comme les matrices DSM et DMM, pour aider les concepteurs à être conscients des interactions existant entre leurs activités. En particulier, nous pensons intéressant d'utiliser les DSM composants et DSM paramètres<sup>85</sup> pour anticiper les interactions potentielles entre les acteurs. Cet outil peut être considéré de façon statique ("avec qui j'ai besoin d'interagir pour concevoir le composant dont je suis responsable ?") et de façon dynamique ("si je modifie un paramètre, quelles sont les activités de mes collaborateurs qui peuvent être impactées ?"). Les DSM paramètres sont peu utilisées car elles peuvent devenir rapidement de très grande taille mais elles reflètent la complexité de la conception. Habituellement, ces matrices sont renseignées au cours d'une réunion de travail spécifique et souvent laborieuse. Un algorithme de partitionnement peut être appliqué à une DSM paramètres. Il permet d'optimiser la séquence de détermination des paramètres afin de limiter les itérations en conception et de regrouper les paramètres les plus fortement interdépendants afin de montrer les équipes de conception potentielles.

Pour avoir un usage courant, nous pensons que l'outil doit être intégré aux pratiques et outils informatiques habituels du concepteur. Celui-ci doit renseigner les interactions qu'il perçoit entre les paramètres dont il a la responsabilité et les autres. Il réalise un filtrage sur les informations qu'il manipule pour finalement décider de celles qu'il est utile de partager. La DSM paramètres pourrait alors se construire progressivement, mettant en évidence des besoins d'interaction et des inconsistances de point de vue entre concepteurs<sup>86</sup>. Chaque concepteur pourrait alors être plus conscient des interactions qui existent entre les différents paramètres de conception et ainsi, entre son activité et celles de ses collaborateurs.

<sup>85</sup> En phase de spécification fonctionnelle, la DSM paramètres peut être remplacée par une DSM "critères de performance", comme par exemple, dans le cas d'une boîte de vitesse, un temps de désengagement du rapport, un temps de crabotage ou le couple maxi en entrée. De telles matrices existent partiellement, au sein de DPMO (au format Excel).

<sup>86</sup> Par exemple, D1 responsable de la détermination du paramètre P1 pense que P1 impacte le paramètre P2 alors que D2 le responsable du paramètre P2 ne perçoit pas cette dépendance. L'origine peut être une inconsistance sémantique, un manque de connaissances de D2 ou une erreur de jugement de D1.

Dans une situation de conception innovante, les critères de performance (espace du problème) et les paramètres de conception (espace de la solution) ne sont pas tous connus au début du projet et sont définis progressivement, de façon collaborative. Notons que les DSM permettent d'assurer la traçabilité de connaissances critiques en conception et sont réutilisables lors de projets de reconception du système. Pour améliorer l'*awareness* sur la qualité des données partagées, sujet sensible lors de collaborations, nous pensons que les matrices DSM et DMM peuvent être utilisées pour supporter de nouveaux indicateurs de maturité d'un projet, relatifs à la robustesse d'une architecture et à la certitude de l'exactitude des données.

En résumé, une approche de ce problème est d'analyser les activités concernées pour déterminer les conditions de bonne intégration de l'outil désiré (analyse des besoins et des contraintes), puis d'utiliser (voire adapter) un langage de modélisation spécifique à l'ingénierie système (SysML) pour modéliser différentes vues du système. La cohérence de ces modèles avec ceux qui supportent le fonctionnement des outils métiers des concepteurs et avec des modèles de processus devra être étudiée avec précaution. Un premier projet de recherche (projet A2P-Num, en collaboration avec PSA/DPMO) va s'intéresser, en partie, à cette problématique. Le développement de mécanisme d'*awareness* pourra en être une extension ultérieure.

### 9.3. *Vers une performance durable du système de conception*

L'état de l'art que nous avons réalisé a montré que quelques laboratoires, souvent en collaboration avec des constructeurs automobiles ou aéronautiques, s'intéressent aussi au couplage entre l'architecture du produit et l'organisation du projet de conception. Cependant, les propositions reposent sur un diagnostic visuel de la cohérence des architectures. Nos travaux sur cette thématique sont novateurs au niveau international. Ils mériteraient d'être poursuivis, en formulant et résolvant des problèmes d'optimisation concernant ce couplage.

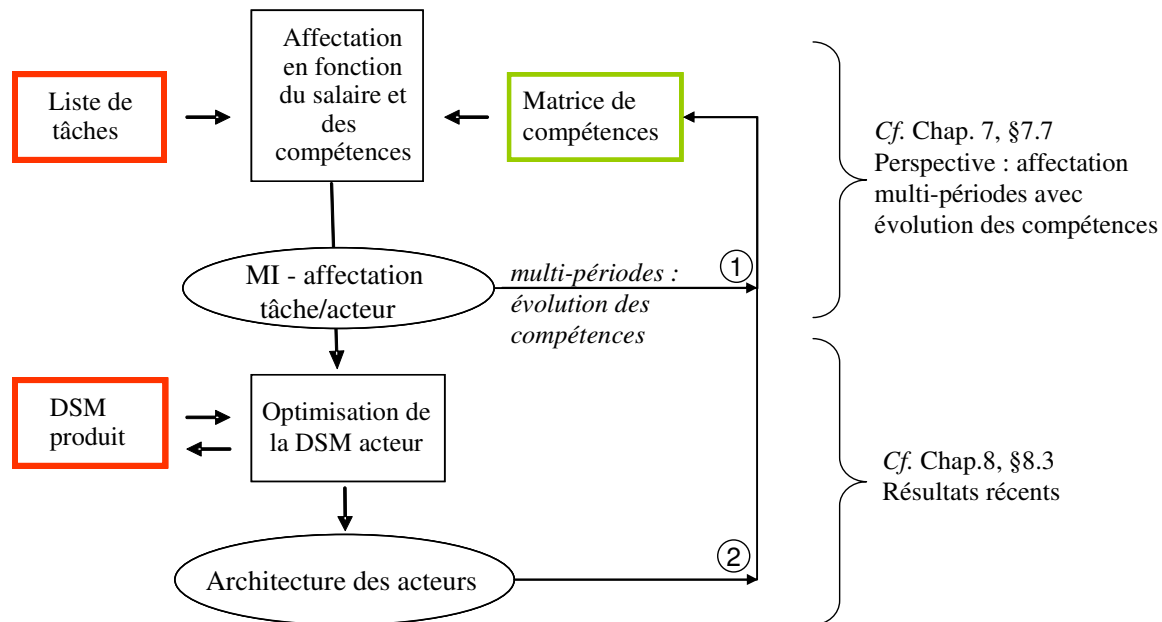
Nous avons défini, dans le Chapitre 1, section 1.4.2 (p.48), les concepts de pertinence et de cohérence. La pertinence d'une organisation peut être assurée en liant la description des tâches à l'architecture du produit, puis à celle des compétences. Nous recherchons la cohérence en optimisant l'utilisation des ressources dans le projet, à court terme (affectation en fonction des coûts salariaux et des niveaux de compétence des acteurs) et à moyen terme (prise en compte d'objectif ou de contraintes de développement de compétences). L'objectif est d'assurer une performance durable des projets à court terme (projets en cours) mais aussi à moyen terme, voire à long terme (projets futurs).

#### **Couplage entre 3 sous-systèmes : produit / projet / compétence.**

Dans une DSM acteurs, les échanges entre acteurs sont modélisés par les flux d'information nécessaires à la conception (des composants) du produit. L'utilisation d'un algorithme de *clustering* permet alors d'optimiser l'architecture des acteurs, c'est-à-dire le regroupement d'acteurs en équipes permettant de minimiser les efforts de coordination. Actuellement, il n'existe pas de travaux qui prennent en compte à la fois l'architecture du produit, les compétences des acteurs et leurs évolutions, pour optimiser l'organisation de projet (affectation des tâches aux acteurs, architecture des acteurs) sur plusieurs périodes.

Dans le Chapitre 8, nous avons présenté un résultat récent permettant, à partir d'une DSM produit et d'une matrice d'incidence modélisant l'affectation des composants du produit aux différents acteurs, de déterminer une DSM acteurs optimale. Dans le Chapitre 7 (section 7.7), nous avons proposé une perspective concernant l'affectation multi-périodes avec prise en compte de l'évolution des compétences. Nous proposons ici de combiner ces deux points, pour réaliser une optimisation conjointe de l'affectation des tâches aux acteurs (premier sous-problème) et de la matrice DSM acteurs (deuxième sous-problème).

La Figure 56 présente schématiquement ce problème. Nous devons le formuler dans le cas multi-périodes et multi-projets (un projet concernant la conception d'un produit) en tenant compte d'une loi d'évolution des compétences et de contrainte de charge des acteurs par période.



**Figure 56 : Vers un couplage structurel**

Un challenge scientifique sera de modéliser une loi d'évolution des compétences entre deux périodes  $k$  et  $k+1$ . Nous pouvons supposer que cette loi dépend des choix d'affectation réalisés à la période  $k$  (première boucle d'évolution) et des collaborations réalisées entre acteurs (seconde boucle). L'intensité d'une interaction entre deux acteurs dans la DSM acteur obtenue pourra servir pour estimer le niveau d'apprentissage croisé entre les acteurs.

Enfin, en raison de cette loi, le type de problème ne sera ni linéaire, ni quadratique. Sa résolution pourra utiliser des techniques d'optimisation de type méta-heuristique.

#### **Couplage entre deux vues (du même sous-système ou non)**

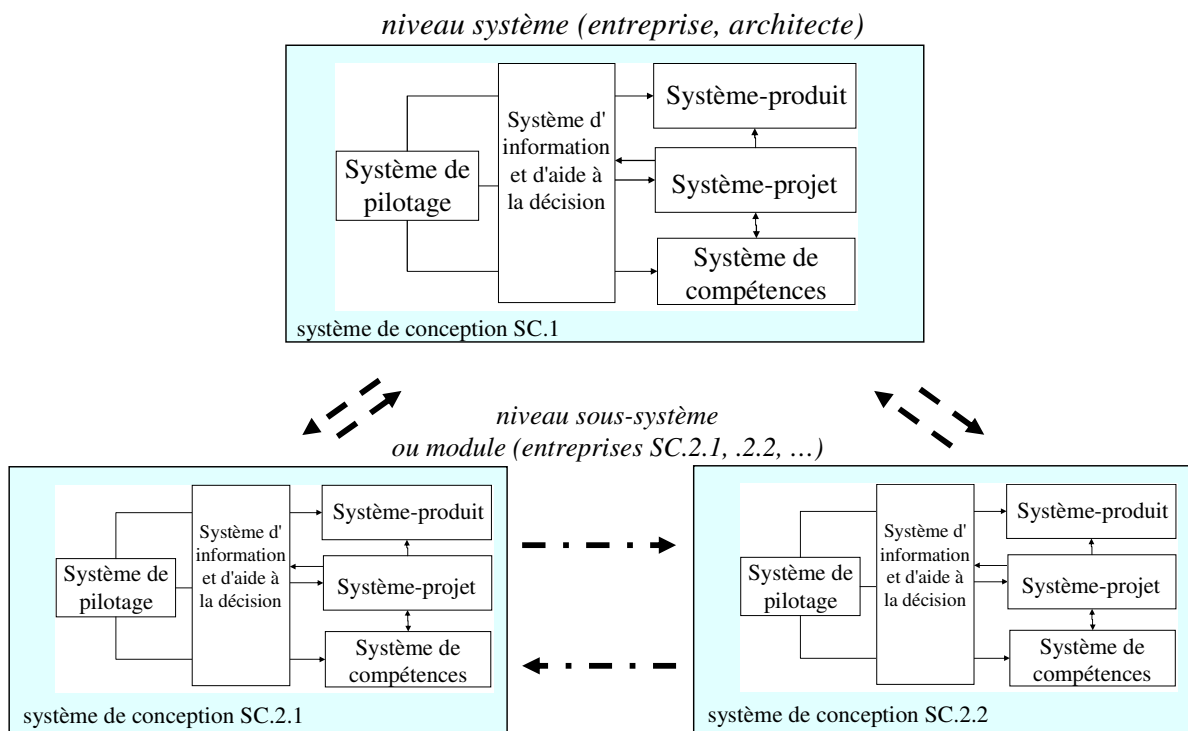
La méthode de propagation que nous avons proposée dans la section 5.3 (p. 90) a une limite : elle ne peut pas tenir compte du fait que dans la réalité, des choix dans un domaine contraignent aussi un autre domaine (par exemple, entre les domaines fonctionnel et organique, la reconduction d'un module, d'un composant ou d'une interface génère des contraintes sur les choix organiques qui contraignent alors les allocations fonctions-composants). Comme première réponse à ce problème, nous avons proposé une méthode de co-évolution dans la section 8.2, mais cette méthode reste partiellement manuelle et ne s'intéresse qu'à deux vues ou sous-systèmes. Des formalismes de modélisation et de propagation de contraintes sont à envisager pour définir conjointement deux vues couplées, voire plus. En particulier, cette approche peut permettre de résoudre différemment le problème, posé ci-dessus, de couplage produit-projet-compétence.

### **9.4. Vers un système agile de systèmes de conception**

La complexité croissante des systèmes oblige les entreprises à considérer autrement leurs relations et partenariats. Par exemple, un constructeur peut s'allier de façon stratégique et durable avec un autre constructeur (besoin d'économie d'échelle, partage de compétences critiques). Il peut développer des relations privilégiées ou opportunistes avec des équipementiers pour profiter d'innovations sur des modules. Il peut aussi provoquer ou susciter des collaborations ou alliances entre des fournisseurs (sous forme de *clusters*) pour agrandir leur champ d'action sur un module

fonctionnel – organique, complet, innovant et fiable, et partager des risques liés à l'innovation. Bien souvent, les frontières organisationnelles peuvent devenir une inertie à la remise en cause des frontières entre les modules du produit et donc, à des sources d'innovation radicale.

Tirés par une stratégie commune liée au produit désiré (ou à un service), ces entreprises doivent partager des modèles de conception, ajuster leurs systèmes de compétences, définir des pratiques communes de pilotage de projets, Etc. Nous considérons l'entreprise étendue comme une extension possible des problèmes d'organisation du système de conception, au niveau d'une chaîne de valeur étendue entre plusieurs partenaires industriels, constituant ainsi un système de systèmes de conception (Figure 57). Selon [Krob et Printz, 2007], "un système de systèmes"<sup>87</sup> (SdS) est un ensemble de systèmes autonomes qui sont interconnectés ensemble pour effectuer une mission commune. Un SdS n'est pas géré globalement par un administrateur business ou technique unique". Des principes de management et de conception d'un système de systèmes ont déjà été préconisés [Maier, 1998 ; Sage et Cuppan, 2001], en distinguant ce concept de celui de systèmes complexes. Dans le cas de systèmes de conception de différents partenaires, répartis géographiquement, les systèmes-projet et les systèmes de pilotage restent autonomes mais deviennent couplés. Les partenaires doivent définir des rôles d'interface et des procédures de conduite communes. Les systèmes d'information souvent hétérogènes doivent être redéfinis pour améliorer les flux d'informations et le partage des modèles de conception. Enfin, des décisions stratégiques doivent concerner la répartition et le développement des systèmes de compétences de chaque partenaire, pour permettre une compétitivité durable, à long terme. La Figure 57 présente les différents sous-systèmes qui devront être interfacés ou intégrés pour réussir à faire émerger un système de systèmes performant.



**Figure 57 : Vers un système de systèmes de conception**

Sur le plan scientifique, les problématiques de couplage par les informations et de couplage structurel, décrites précédemment (§ 9.2, § 9.3), sont rendues ici plus compliquées par les frontières organisationnelles existant entre les entreprises, par des pratiques et des outils de conception hétérogènes (problème d'interopérabilité des applications d'entreprise [Panetto, 2006])

<sup>87</sup> Leader sur ce thème, le département américain de la défense (US DoD) a rédigé un guide sur l'ingénierie de système de systèmes.

et par des mécanismes de confiance<sup>88</sup> [Boucher, 2007] et d'intérêts propres ou communs, difficiles à modéliser.

Cette dernière perspective s'inscrit sur le long terme et dans une tendance actuelle de recherche d'une plus grande agilité et maturité de l'ingénierie de systèmes [Turner, 2007 ; Madni, 2008]. Elle nécessiterait une collaboration avec des chercheurs d'autres disciplines scientifiques et avec un groupe d'entreprises qui accepteraient d'explicitier leur stratégie et auraient un intérêt mutuel, concernant la conception d'un système complexe.

Pour limiter l'étendue de cette perspective, nous pensons que l'intérêt de notre approche est de considérer le système-produit comme l'élément structurant et fédérateur de ce système. L'enjeu est d'aider une entreprise à apprécier la pertinence de sa stratégie dans un réseau de partenaires (par exemple, quel module doit-elle développer ? en collaboration avec qui ? quel développement doit-elle envisager de son système de compétences ? quelle est la répartition des incertitudes dans les projets de conception entre elles et ses partenaires ?).

Les choix d'architecture d'un système en modules et d'allocation d'un module à un fournisseur donné structurent le réseau de valeur stratégique. La décision de confier la conception d'un module à un fournisseur ou d'acquérir une offre innovante est stratégique. Elle dépend des compétences présumées de ce fournisseur à satisfaire les performances futures du système et du projet (niveau d'innovation, niveau de risque, respect des spécifications, des délais et des coûts). Le périmètre d'un module peut être redéfini si le fournisseur innove en intégrant de nouvelles fonctions (évolution nécessaire de ses compétences) ou si des fournisseurs collaborent pour fournir une réponse plus globale. Cette évolution peut être favorable pour l'architecte qui peut ainsi améliorer la valeur globale du système et limiter le nombre d'interfaces à l'intérieur du système (intégration facilitée). Cependant, elle peut s'accompagner d'un niveau de risque supplémentaire dans le projet lié à la complexité croissante du module (en particulier, est-ce que les compétences correspondant à son ingénierie seront bien développées ?).

L'utilisation d'outils de l'intelligence artificielle distribuée (en particulier, les systèmes multi-agents [Ferber, 1995]) nous semble une voie appropriée pour modéliser et simuler des scénarii d'évolution de systèmes de conception. En effet, ils sont adaptés pour modéliser des modifications de structure (introduction d'un nouvel élément) et des mécanismes de coordination de processus autonomes ou de négociation entre agents (ayant certains intérêts communs et d'autres différents). Ces outils ont été utilisés pour la simulation des interactions entre les acteurs d'un réseau dans le cas d'une chaîne logistique [Gamoura-Chehbi *et al.*, 2006] ou pour une aide à la planification d'un système de conception, intégrant une modélisation d'activités parallèles ou itératives [Sohnius *et al.*, 2007]. Les modèles de l'architecture du produit et son éventuelle évolution (DSM produit), s'ils sont partagés, peuvent servir de référents communs à chaque agent et guider leur comportement, pour faire émerger une architecture consensuelle et une organisation de projet adaptée (affectation des tâches de conception à chaque agent, choix d'interactions entre agents). Le challenge scientifique est de modéliser l'environnement des agents (par exemple, l'évolution du marché en termes d'exigences sur le produit, l'évolution de l'offre en termes de modules innovants), les potentialités de chaque agent en termes de développement de nouvelles compétences (c'est-à-dire sa capacité à apprendre et à s'adapter, ainsi que le coût associé), les collaborations et les conflits d'intérêts entre agents, Etc. Il s'agit aussi de définir des critères d'évaluation de performance pour chaque agent et un objectif commun, comme par exemple, améliorer la valeur du produit, maîtriser le rapport risques/opportunités du projet, réduire le délai de conception. La simulation s'attachera à évaluer les performances du système selon différents scénarii d'évolution de l'environnement du système et mettra en évidence des structures performantes et robustes de chaîne de valeur.

---

<sup>88</sup> L'utilisation de théorie mathématique comme la théorie des jeux a été proposée par [Boucher, 2007] pour modéliser les mécanismes de confiance entre entreprises et simuler des scénarii d'évolution des organisations.

## 9.5. Vers une ingénierie de systèmes micro-mécatroniques

La perspective d'orienter notre recherche vers l'ingénierie des systèmes micro-mécatroniques est une opportunité en phase avec les orientations stratégiques de notre laboratoire (intégration du LAB au sein de FEMTO-ST, devenu le Département AS2M, depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2008) et le contexte industriel franc-comtois, spécialisé dans les microtechniques.

La miniaturisation des produits et l'intégration d'un plus grand nombre de fonctions dans un faible volume sont deux tendances fortes dans tous les secteurs d'activité. La conséquence en est un marché en forte croissance dans le développement d'objets de dimensions micrométriques<sup>89</sup> (le "micro-monde").

Le pôle de compétitivité des microtechniques a inscrit dans sa stratégie à moyen terme d'aider les entreprises franc-comtoises à "passer de la pièce au composant"<sup>90</sup>, défini ici comme un assemblage de pièces, voire à réaliser des produits utilisables par les consommateurs (impact fort sur l'image de marque de la Région). Différents courants de recherche co-existent, relevant des défis technologiques et des challenges scientifiques déjà difficiles.

D'un côté, des études portent sur les propriétés physiques de matériaux ou objets, à l'échelle micro- et nanoscopique, sur des modélisations multi-physiques de phénomènes physiques et sur le développement de nouvelles technologies de micro-fabrication [De Labachellerie, 2004], permettant de concevoir et de réaliser des micro-systèmes<sup>91</sup> (ou MEMS : *Micro-Electro-Mechanical-Systems*), pièces de taille micrométrique. Cette démarche de conception s'appuie sur les propriétés des matériaux et des procédés de micro-fabrication souvent difficiles à maîtriser. Des recherches sont menées pour intégrer plus de fonctions sur un MEMS. La conséquence est que les délais de conception des MEMS et de mise au point de leur système de fabrication s'allongent.

D'un autre côté, les industriels expriment leur besoin pour une meilleure maîtrise de l'ingénierie de systèmes micro-mécatroniques intégrant des technologies fortement différentes (par exemple, micro-fabrication en salle blanche pour les MEMS et micro-usinage traditionnel pour un engrenage de taille microscopique) et faisant appel à des métiers différents. Ces systèmes étant conçus comme l'assemblage de composants du micro-monde, il convient de disposer d'un système d'assemblage adapté aux spécificités de cet environnement. Pour cela, des travaux de recherche s'intéressent à l'étude du comportement dynamique des objets du "micro-monde", au développement de structures microrobotiques et à l'étude des procédés de micro-manipulation et de micro-assemblage, permettant de concevoir et réaliser des systèmes d'assemblage adapté.

Nous avons réalisé un état de l'art sur les travaux réalisés dans le domaine des Sciences et Techniques de la Production pour le micro-monde. Des chercheurs ont proposé des méthodologies de conception de MEMS [Senturia, 2001 ; Watty et Binz, 2007] ou les systèmes micro-mécatroniques, reposant souvent sur une capitalisation des règles de conception [Albers *et al.*, 2003 ; 2007 ; Albers et Marz, 2004 ; De Grave, 2004 ; Zha *et al.*, 2005]. A notre connaissance, ces travaux ne prennent pas en compte les difficultés liées à l'assemblage de MEMS et de composants micro-mécaniques (fragilité des MEMS, manipulation unitaire difficile, conditions de mise en œuvre différentes, Etc.).

<sup>89</sup> D'une taille variant de quelques micromètres jusqu'au millimètre.

<sup>90</sup> "Face à la fabrication de pièces, à fonction unique, largement concurrencée par les productions de masse, les entreprises de Franche-Comté ont tout intérêt à développer la fabrication de composants, multifonctions, et qui eux mêmes assemblent les pièces. Voir s'attaquer aux systèmes plus complexes associant d'autres disciplines." - Source : [www.polemicrotechniques.fr/strategie.pdf](http://www.polemicrotechniques.fr/strategie.pdf) Les pièces fabriquées ou les composants assemblés ne sont pas perceptibles par les consommateurs car ils sont intégrés dans un système. C'est l'entreprise qui réalise le système qui profite d'une image de marque "high-tech" par le grand public.

<sup>91</sup> Nous utilisons le terme de système micro-mécatronique pour désigner un produit composé de plusieurs composants de très petite taille, pouvant être, par exemple, des actionneurs, capteurs ou micro-processeurs. Le terme micro-système désigne couramment les MEMS.

De plus, la personnalisation accrue exigée par les clients pousse vers une grande diversité des produits impliquant une réduction des volumes de production (plus de produits en moyenne quantité). Le système d'assemblage doit alors satisfaire des exigences concernant la très haute précision des opérations, la capacité à manipuler et assembler des composants de très petites tailles et la flexibilité pour produire les différentes variantes à moindre coût.

Une réponse à ce problème est de concevoir et de réaliser une usine de production de petite taille et modulaire, appelée "micro-usine" [Gendreau et al., 2003 ; 2007]. La conception modulaire de la micro-usine se justifie par le grand nombre de variantes possibles, par l'obsolescence rapide de ce type de produits et par le besoin de réduire les délais de conception produit-process. Des études en cours portent sur l'évaluation de performances d'une architecture modulaire pour une micro-usine et son système de commande, en fonction d'évolutions possibles du mix produit [Descourvières et al., 2007].

Au niveau industriel, force est de constater l'absence de "savoir-faire métier" dans l'ingénierie de systèmes de production et des produits adaptés au micro-assemblage. Au niveau scientifique, il n'existe pas actuellement de travaux sur une méthode de conception intégrée de l'architecture d'un système micro-mécatronique et de son système d'assemblage<sup>92</sup>. Nos travaux antérieurs ainsi que l'expertise déjà acquise par le département AS2M de FEMTO-ST sur les procédés de micro-assemblage et sur les micro-usines nous permettent de penser que nous pourrions apporter une contribution intéressante à cette problématique.

En effet, des travaux récents [Perrard *et al.*, 2007] ont été réalisés pour déterminer une gamme d'assemblage à partir d'une architecture donnée d'un produit micro-mécatronique (liste connue des composants et de leurs interactions). Le choix de l'architecture du produit va contraindre la détermination de la gamme puisqu'il prédétermine les interactions entre les composants et car un ensemble de composants peut être défini comme un module (un sous-assemblage). Inversement, des solutions d'architecture peuvent être pénalisantes du point de vue de la gamme d'assemblage. En effet, dans le domaine du micro-monde, la répétabilité des procédés d'assemblage peut être mauvaise (par exemple, en raison des phénomènes électrostatiques) et conduire à des performances de gammes différentes.

Une piste de recherche est de développer une méthode pour simuler très tôt l'impact du choix de l'architecture du produit sur le choix de la gamme d'assemblage, ou pour optimiser globalement l'architecture du produit (choix des interactions entre composants) et la gamme d'assemblage associée. Il s'agit aussi de proposer une méthode de calcul global de performance d'une gamme de fabrication et d'assemblage, tenant compte des probabilités d'échec, liées aux choix des procédés.

Une extension de cette piste est le développement d'une méthode pour aider à la conception d'une famille de systèmes micro-mécatroniques et la micro-usine flexible associée, conçue de façon modulaire (décomposition en modules sur étagère, un module pouvant être lui-même conçu de façon modulaire [Rakotondrabe, 2006]). En fonction des variantes de la famille de produits, il s'agit de déterminer les modules à mettre en place dans la micro-usine pour assurer la production, garantir des cadences de production adaptées à chaque variante et déterminer le niveau de flexibilité nécessaire pour adapter la micro-usine à l'évolution technologique des produits.

---

<sup>92</sup> Un travail à l'EPFL au sein du laboratoire de Production Microtechnique a porté sur la justification économique de cellules flexibles de micro-assemblage [Chollet et al., 2003].



## Partie VII. Bibliographie

- [Aamodt et Plaza, 1994] Aamodt A., Plaza E., "Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches", *Artificial Intelligence Communications*, Vol. 7, N°1, pp. 39-52, 1994.
- [Acuna et Juristo, 2004] Acuna S.T., Juristo N., "Assigning people to roles in software projects", *Software Practice and Experience*, N°34, pp. 675-696, 2004.
- [Agard, 2002] Agard B., "Contribution à une méthodologie de conception de produits à forte diversité", thèse de doctorat en génie industriel, INPG Grenoble, 2002.
- [Agard et Tollenaere 2003] Agard B., Tollenaere M., "Méthodologie de conception des familles de produits", *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, Vol. 37, N°6, pp. 755-777, 2003.
- [Akao, 1990] Akao Y., "Quality Function Deployment, QFD – Integrating Customer Requirements into Product Design", Productivity Press, Portland, ON, USA, 1990.
- [Albers et al., 2007] Albers A., Burkardt N., Deigendesch T., Marz J., "Micro-specific design flow for tool-based microtechnologies", *Microsystems Technologies*, Vol. 13, pp. 305-310, 2007.
- [Albers et Marz, 2004] Albers A., Marz J., "Restrictions of production engineering on micro-specific product development", *Microsystem Technologies*, Vol. 10, pp. 205-210, 2004.
- [Albers et al., 2003] Albers A., Marz J., Burkardt N., "Design methodology in micro technology", *Int. Conf. Engineering Design, ICED'03*, Stockholm, August 19-21, 2003.
- [Aldanondo et al., 2007] Aldanondo M., Vareilles E., Lahmar Y., Baron C., Moynard G., "Une approche pour la configuration cohérente de produit et de gamme de production", *Journal Européen des Systèmes Automatisés – JESA*, Vol. 41, N°5, pp. 567-584, 2007.
- [Aldanondo et al., 2008] Aldanondo M., Vareilles E., Djefel M., Baron C., Auriol G., Geneste L., Zolghadri M., "Vers un couplage de la conception de produit avec la planification de son développement", *Conférence Internationale de Modélisation et de Simulation, MOSIM 2008*, Paris, Belgique, Avril 2008.
- [Alizon et al., 2007a] Alizon F., Moon S., Shooter S., Simpson T., "Three dimensional Design Structure Matrix with cross-module and cross-interface analysis", *ASME Design Engineering Technical Conferences – Design Automation Conference*, Liou, F., Ed., Las Vegas, NV, September 4-7, ASME, Paper N°DETC2007/DAC-34510, 2007.
- [Alizon et al., 2007b] Alizon F., Khadke K., Thevenot H., Gershenson J., Marion T., Shooter S., Simpson T., "Frameworks for product family design and development", *Concurrent Engineering*, Vol. 15, pp. 187-199, 2007.
- [Altus et al., 1996] Altus S., Kroo I., Gage, P., "A Genetic Algorithm for Scheduling and Decomposition of Multidisciplinary Design Problems," *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 118, N°4, pp. 486-489, 1996.
- [Arditi et Tokdemir 2001] Ardit D., Tokdemir K.S., "Effect of learning on line balancing scheduling", *International Journal of Project Management*, Vol. 19, pp. 236-277, 2001.
- [Avak, 2006] Avak B., "Life cycle adaptation of modular product families", *1<sup>st</sup> Nordic Conference on Product Lifecycle Management*, Goteborg, 2006.
- [Baldwin et Clark, 1997] Baldwin C., Clark, K., "Managing in the Age of Modularity", *Harvard Business Review*, Vol. 75, N°5, pp. 84-93, September-October 1997
- [Baldwin et Clark, 2000] Baldwin C., Clark, K., "Design Rules: The Power of Modularity Design", MIT Press, 471p., ISBN 0262024667, 2000.
- [Baron, 2005] Baron C., "L'évaluation dans la conception système – Vers une aide à la conduite de projet", HDR, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005
- [Bennour, 2004] Bennour M., "Contribution à la Modélisation et à l'Affectation des Ressources Humaines dans les Processus", Thèse de doctorat en Systèmes Automatiques et Microélectroniques, Université de Montpellier, 2004.
- [Bennour et Crestani, 2007] Bennour M., Crestani D., "Using competencies in performance estimation: From the activity to the process", *Computers in Industry*, Vol. 58, pp. 151-163, 2007.
- [Berio et Harzallah, 2005] Berio G., Harzallah M., "Knowledge Management for Competence Management", *Journal of Universal Knowledge Management*, Vol. 0, N°1, pp. 21-28, 06.2005
- [Blackenfelt et Sellgren, 2000] Blackenfelt M., Sellgren U., "Design of robust interfaces in modular products", *DETC00, Proceedings of the 2000 ASME Design Engineering Technical Conferences*, Paper no. DETC00/DAC-14486, Sept. 10-13, 2000, Baltimore, 2000.
- [Blackenfelt, 2001] Blackenfelt M., "Managing complexity by product modularization", *Doctoral Thesis*, Dept. Of Machine Design, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2001.

- [Boothroyd *et al.*, 2002] Boothroyd G., Dewhurst P., Knight W., "Product Design For Manufacture and Assembly", Marcel Dekker Inc., New York, 2002.
- [Boucher, 1999] Boucher X., "Contribution méthodologique pour la gestion de filières métiers dans un contexte d'Ingénierie Concourante", Thèse de doctorat, Université d'Aix, Marseille III, Septembre 1999.
- [Boucher et Burlat, 2003] Boucher X., Burlat P., "Vers l'intégration des compétences dans le pilotage des performances de l'entreprise", Journal Européen des Systèmes Automatisés, JESA, Vol. 37, N°3, pp 363-390, 2003.
- [Boucher *et al.*, 2006] Boucher X., Bonjour E., Grabot B., "Formalisation and use of competencies for industrial performance optimisation: a survey", Computers in industry, Vol. 58, N°2, pp. 98-117, February 2007.
- [Boucher, 2007] Boucher X., "Vers un pilotage agile de l'évolution des systèmes de production", HDR, Ecole des Mines de Saint-Etienne, 12 novembre 2007.
- [Bradley et Yassine, 2008] Bradley J., Yassine A., "A Multi-Domain Analysis Framework for Product Development", Proceedings of ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences. 20<sup>th</sup> Int. Conf. On Design Theory and Methodology (DTM), DETC 2008-49361, New York City, NY, USA, August 3-6, 2008
- [Braha, 2002] Braha D., "Partitioning Tasks To Product Development Teams", Proceedings of DETC'02 ASME 2002 International Design Engineering Technical Conferences Montreal, Canada, September 29-October 2, 2002.
- [Brans, 2002] Brans J.P., Mareschal B., "PROMETHEE-GAIA : une méthodologie d'aide à la decision en presence de critères multiples", Editions Ellipses, 2002.
- [Browning, 1998] Browning T.R., "Use of dependency structure matrices for product development cycle time reduction", Proceedings of the 5<sup>th</sup> ISPE international conference on concurrent engineering: research and applications, Tokyo, Japan, 1998.
- [Browning, 1999] Browning, T.R., "Designing system development projects for organizational integration", Journal of Systems Engineering, Vol. 2, N°4, pp. 217-225, 1999.
- [Browning, 2001] Browning T.R., "Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: A Review and New Directions", IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. 48, N°3, pp. 292-306, 2001.
- [Cai et Li, 2000] Cai X., Li K.N., "A genetic algorithm for scheduling staff of mixed skills under multi-criteria", European Journal of Operational Research, Vol. 125, pp.359–369, 2000.
- [Candès, 2006] Candès E., "Compressive sampling", Proceedings of the International Congress of Mathematicians, Madrid, Spain, 2006.
- [Candès et Tao, 2005] Candès E., Tao T., "Decoding by Linear Programming", IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 51, N° 12, pp. 4203-4215, 2005.
- [Canos et Liern, 2004] Canos L., Liern V., "Some fuzzy models for human resource management", Int. Journal of Technology, Policy and Management, Vol. 4, N°4, 2004, pp 291-308.
- [Carroll *et al.*, 2006] Carroll J., Rosson M., Convertino G., Ganoe C., "Awareness and teamwork in computer-supported collaborations", Interacting with Computers, Vol. 18, pp. 21-46, 2006.
- [Cauvin, 2005] Cauvin A., "Analyse, modélisation et amélioration de la réactivité des systèmes de décision dans les organisations industrielles – Vers une aide à la conduite des processus d'entreprise dans un contexte perturbé", mémoire de HDR, Université Aix-Marseille, 2005.
- [Certa *et al.*, 2006] Certa A., Enea M., Galante G., Lafata C.M., "Multi-skilled human resources allocation in R&D projects", 8<sup>th</sup> international conference on the Modern Information Technology in the Innovation Processes of the Industrial Enterprises, Budapest, Hungary, 11-12 September 2006.
- [Chapurlat, 2007] Chapurlat V., "Vérification et validation de modèles de systèmes complexes: application à la Modélisation d'Entreprise", HDR de l'Université de Languedoc-Montpellier, mars 2007.
- [Chen K. et Liu, 2005] Chen K.M, Liu R.J., "Interface strategies in modular product innovation", Technovation, Vol. 25, pp. 771-782, 2005.
- [Chen L. *et al.*, 2005] Chen L., Ding Z., Li S., "A formal two-phase method for decomposition of complex design problems", Transactions of ASME, Journal of Mechanical Design, Vol. 127, pp. 184-195, 2005.
- [Chen S.J. et Lin, 2003] Chen S.J. (Gary), Lin L., "Decomposition of interdependent task group for concurrent Engineering", I.J. Computers & Industrial Engineering, Vol. 44, pp. 435-459, 2003.
- [Chen S.J et Lin, 2004] Chen S.J. (Gary), Lin L., "Modeling team member characteristics for the formation of a multifunctional team in Concurrent Engineering", IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. 51, N°2, pp. 111-124, 2004.
- [Chen S.J., 2005] Chen S.J. (Gary), "An integrated methodological framework for project task coordination and team organization in concurrent engineering", Concurrent Engineering: Research and Applications, Vol. 13, N°3, pp. 185-197, 2005.
- [Cho et Cho S., Eppinger S.D., "Product development process modeling using advanced calcul", Proceedings

- Eppinger, 2001]** of DETC'01 ASME 2001 Design Engineering Technical Conferences Pittsburgh, Pennsylvania September 9-12, 2001.
- [Chollet et al., 2003]** Chollet S.K., Bourgeois F., Jacot J., "Economical Justification of Flexible Microassembly Cells", Proc. of IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, pp. 48-53, 10-11 July 2003.
- [Clarkson et al., 2004]** Clarkson P., Simons C., Eckert C., "Predicting change propagation in complex design", ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 126, N° 5, pp. 765-797, September 2004.
- [Crawley et al., 2004]** Crawley E., De Weck O., Eppinger S., Magee C., Moses J., Seering W., Schindall J., Wallace D., Whitney D., "The influence of architecture in engineering systems", Paper presented at the MIT Engineering Systems Symposium. Cambridge, MA. March 29-31, 2004.
- [Dahmus et al., 2001]** Dahmus J., Gonzalez-Zugasti J., Otto K., "Modular Product Architecture", Design Studies, Vol. 22, N°5, pp. 409-424, 2001.
- [Danilovic et Browning, 2007]** Danilovic M., Browning T.R., "Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices", International Journal of Project Management, Vol. 25, pp. 300-314, 2007.
- [David et al., 2002]** David M., Idelmerfaa Z., Richard J., "Organization method for complex cooperative design projects." IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Hammamet, 2002.
- [Darses et Falzon, 1996]** Darses, F., Falzon, P., "La conception collective : une approche de l'ergonomie cognitive", In G. de Terssac, E. Friedberg (Eds.), *Coopération et Conception* (pp. 123-135). Toulouse: Octarès Ed., 1996.
- [De Grave, 2004]** De Grave A., "Conception intégrée de micro systèmes électro-mécaniques", Thèse de Doctorat de l'INPG, Grenoble, 2004.
- [De Korvin et al., 2002]** De Korvin A., Shipley F., Kleyle R., "Utilizing fuzzy compatibility of skill sets for team selection in multi-phase projects", Journal of Engineering Technology Management, Vol. 19, pp 307-319, 2002.
- [De Lit, 2001]** De Lit P., "A comprehensive and integrated approach for the design of a product family and its assembly system", Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles, Belgique, 2001.
- [De Lit et al., 2003]** De Lit P., Delchambre A., Henrioud JM., "An integrated approach for product family and assembly system design", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 19, N°2, pp. 324-334, 2003.
- [Deciu et al., 2003]** Deciu E.R., Ostrosi E., Ferney M., Gheorghe M., "Configuration of product families using fuzzy set approach", Proc. Of the 14<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design (ICED'03), CD ROM, Stockholm, Sweden, 19-21 August 2003.
- [Deciu et al., 2005]** Deciu E., Ostrosi E., Ferney M., Gheorghe M., "Configurable product design using multiple fuzzy models", Journal of Engineering Design, Vol. 16, N°2, pp. 209-233, April 2005.
- [De Labacherie, 2004]** De Labacherie M., "Techniques de fabrication des microsystèmes 1 : structures et microsystèmes électromécaniques en couches minces", *Traité EGEM, série Microsystèmes*, Hermès, 2004.
- [Deneux, 2002]** Deneux D., "Méthodes et modèles pour la conception concourante", HDR, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 24 Janvier 2002.
- [De Rosnay 1975]** De Rosnay J., "Le microscope", Editions du Seuil, 1975.
- [De Terssac et al., 1996]** De Terssac G., Friedberg E. (Sous la Dir.), "Coopération et Conception", Ed. Octares, Toulouse, 1996.
- [Descourvières et al., 2007]** Descourvières E., Debricon S., Gendreau D., Lutz P., Philippe L., Bouquet F., "Towards automatic control for microfactories.", Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Automation, IAIA'2007, Canada, 2007.
- [Détienne, 2006]** Détienne F., "Collaborative design: managing task interdependencies and multiple perspectives", *Interacting with Computers*, Vol. 18, pp. 1-20, 2006.
- [D'Souza et Simpson, 2003]** D'Souza B., Simpson T., "A Genetic Algorithm Based Method for Product Family Design Optimization", *Engineering Optimization*, Vol. 35, N°1, pp. 1-18, 2003.
- [Dourish et Bellotti, 1992]** Dourish, P., Bellotti, V., "Awareness and coordination in shared workspaces", In Proceedings of the ACM CSCW'92 Conference on Computer Supported Cooperative Work. ACM Press, New York, pp. 107-113, 1992.
- [Du et al., 2001]** Du X., Jiao J., Tseng M., "Architecture of Product family: Fundamentals and Methodology", *Concurrent Engineering: Research and Applications*, Vol. 9, N°4, pp. 309-325, 2001.
- [Du et al., 2002]** Du X., Jiao J., Tseng M., "Graph Grammar Based Product Family Modeling", *Concurrent Engineering: Research and Applications*, Vol. 10, N°2, pp. 113-128, 2002.
- [Dufrène, 1991]** Dufrène L., "Contribution à une méthodologie de conception des systèmes d'assemblage pour familles de produits", thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 1991.
- [Dulmet, 2000]** Dulmet M., "De l'exploitation des systèmes de production à l'ingénierie produit-process : Une approche méthodologique de l'organisation de l'activité", HDR, Université de Franche-Comté, 21 décembre 2000.

- [Eichinger *et al.*, 2006] Eichinger M., Maurer M., Pulm U., Lindemann U. "Extending Design Structure Matrices and Domain Mapping Matrices by Multiple Design Structure Matrices", Proceeding of the 8<sup>th</sup> Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis (ASME-ESDA06), Torino, Italy, July 4-7 2006.
- [Eiselt et Marianov, 2008] Eiselt H.A., Marianov V., "Employee positioning and workload allocation", Computers and Operations Research, Vol. 35, N°2, pp. 513-524, February 2008.
- [Eppinger *et al.*, 1994] Eppinger S., Whitney D., Smith R., Gebala D., "A model-based method for organizing tasks in product development", Research in Engineering Design, Vol. 6, N°1, pp.1-13, 1994.
- [Eppinger et Salminen, 2001] Eppinger S., Salminen V., "Patterns of product development interactions", Int. Conf. On Engineering Design, ICED, Glasgow, August 21-23, Vol. 1, pp. 283-290, 2001
- [Erixon, 1998] Erixon G., "Modular Function Deployment – A method for product modularisation", PhD thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1998.
- [Ermine, 2002] Ermine J.L., "La gestion de connaissances", Eds. Hermès, 2<sup>ème</sup> édition, 2002.
- [Ernst *et al.*, 2004] Ernst A.T., Jiang H., Krishnamoorthy M., Sier D., "Staff scheduling and rostering: a review of applications, methods and models", European Journal of Operation Research, Vol. 153, pp. 3-27, 2004.
- [Eynard *et al.*, 2004] Eynard B., Lombard M., Matta N., Renaud J. (sous la Dir. De), "Gestion dynamique des connaissances industrielles", Traité IC2, série Informatique et systèmes d'information, Hermès, Lavoisier, 10-2004.
- [Eynard, 2005] Eynard B., "Gestion du cycle de vie des produits et dynamique des connaissances industrielle en conception intégrée", HDR, Université de Technologie de Troyes, novembre 2005.
- [Ferber, 1995] Ferber, J. "Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective", InterEditions, Paris, 1995.
- [Fernandez 1998] Fernandez C., "Integration analysis of product architecture to support effective team co-location", MS Thesis, Massachusetts Institute of Technology MIT, USA, 1998.
- [Fine, 1998] Fine, C.H., "Clockspeed — Winning industry control in the age of temporary advantage", Perseus Books, Reading, MA. 1998.
- [Fine, 2005] Fine C.H., "Are you modular or integral? Be sure your supply chain knows: the hidden source of business model malaise: mismatched architectures", Strategy & Competition, Summer 2005.
- [Fitzpatrick et Askin, 2005] Fitzpatrick E., Askin R., "Forming effective worker teams with multi-functional skill requirements", I.J. Computers and Industrial Engineering, Vol. 48, pp.593–608, 2005.
- [Fixson, 2005] Fixson, S., "Product architecture assessment: a tool to link product, process and supply chain design decisions", Journal of Operations Management, Vol. 23, pp. 345-369, 2005
- [Franchini *et al.*, 2001] Franchini L., Caillaud E., Nguyen P., Lacoste G., "Workload control of human resources to improve production management", I. J. of Production Research, Vol. 39, pp. 1385-1403, 2001.
- [Fuchs *et al.*, 2006] Fuchs B., Lieber J., Mille A., Napoli A., "A general strategy for adaptation in Case-Based Reasoning", Rapport de recherche RR-LIRIS-2006-016, 2006.
- [Galbraith, 1977] Galbraith, J. R., "Organization design", Reading, MA: Addison-Wesley, 1977.
- [Gamoura-Chehbi *et al.*, 2006] Gamoura-Chehbi S., Ouzrout Y., Bouras A., "Simulation de prise de décision dans la Supply Chain : une approche multi-agents", 6<sup>e</sup> Conférence Francophone de Modélisation et SIMulation – MOSIM'06 – du 3 au 5 avril 2006 – Rabat- Maroc
- [Gendreau *et al.*, 2003] Gendreau D., Haddab Y., Lutz P., Perrard C., "Nouvelle approche dans l'analyse pour la conception des systèmes de production appliquée aux microcomposants", Actes du 5<sup>ème</sup> Congrès International de Génie Industriel, GI'03., Québec, Canada, 2003.
- [Gendreau *et al.*, 2007] Gendreau D., Gauthier M., Hériban D., Lutz P., "Contribution à la mise en place d'une architecture modulaire pour la conception des microsystèmes de production.", Actes du 7<sup>ème</sup> Congrès International de Génie Industriel, GI'2007, Trois Rivières, Canada, 2007.
- [Génelot, 1992] Génelot D., "Manager dans la complexité, réflexions à l'usage des dirigeants", Ed INSEP, Paris 1992.
- [Gershenson *et al.*, 2004] Gershenson, J. K., Prasad, G. J., et Zhang, Y. "Product modularity: measures and design methods". Journal of Engineering Design. Vol. 15. N°1. pp. 33-51, Feb 2004.
- [Giard, 1991] Giard V., "Gestion de projet", Economica, Paris, 1991.
- [Girard et Doumeingts, 2004] Girard P., Doumeingts G., "Modelling of the engineering design system to improve performance", I.J. Computers & Industrial Engineering, Vol. 46, N°1, pp. 43-67, 2004.
- [Girard et Robin, 2006] Girard P., Robin V., "Analysis of collaboration for project design management", Computers in Industry, Vol. 57, pp.817-826, 2006.
- [Grabot et Letouzy, 2000] Grabot B., Letouzy A., "Short-term manpower management in manufacturing systems: new requirement and DSS prototyping", Computers in Industry, Vol. 43, pp. 11-29, 2000.
- [Gronau *et al.*, 2007] Gronau N., Fröming J., Schmid S., Rüssbüldt U., "Approach for requirement oriented team building in industrial processes," Computers in Industry, Vol. 58, N°2, pp. 179-187, 2007.

- [Gulati et Eppinger, 1996] Gulati R., Eppinger S., "The Coupling of Product Architecture and Organizational Structure Decisions", Massachusetts Institute of Technology, Working Paper Number 3906, 1996.
- [Guo et Gershenson, 2004] Guo F. et Gershenson J.K., "A Comparison of Modular Product Design Methods Based on Improvement and Iteration", Proc. Of the 2004 ASME Design Engineering Technical Conferences – 16th International Conference on Design Theory and Methodology. 2004. Salt Lake, City, Utah.
- [Gupta et Krishnan, 1998] Gupta S., Krishnan V., "Product family-based assembly sequence design methodology", IIE Transactions, Vol. 30, N°10, pp. 933-945, October 1998.
- [Gutiérrez – Estrada, 2007] Gutiérrez-Estrada C., "Méthodes et outils de la conception système couplée à la conduite de projet", Thèse de doctorat, INSA Toulouse, 06 Février 2007
- [Gzara-Yesilbas et al., 2006] Gzara-Yesilbas L., Rose B., Lombard M., "Specification of a repository to support collaborative knowledge exchanges in IPPOP project", Computers in Industry, Vol. 57, N°8-9, pp. 690-710, 2006.
- [Hadj-Hamou, 2002] Hadj-Hamou K., "Contribution à la conception de produits à forte diversité et de leur chaîne logistique : une approche par contraintes", thèse de doctorat, INP Toulouse, 2002.
- [Hadj-Hamou et al., 2002] Hadj-Hamou K., Aldanondo M., Lamothe J., Caillaud E., "Configurateur et modeleur CAO : deux outils complémentaires pour l'aide à la conception de produits à forte diversité", International Journal of Design and Innovation Research, Vol. 3, N°1-2, pp 81-95, 2002.
- [Hadj-Hamou et al., 2004] Hadj-Hamou K., Caillaud E., "Cooperative Design: a Framework for Competency Based Approach", 5<sup>th</sup> Int. Conf. On Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, IDMM'E'04, Université de Bath, 5-7 avril 2004.
- [Harani, 1997] Harani Y., "Une approche multi modèles pour la capitalisation des connaissances dans le domaine de la conception", thèse de doctorat, Université de Grenoble, 1997.
- [Harzallah 2000] Harzallah M., "Modélisation des aspects organisationnels et des compétences pour la réorganisation d'entreprise industrielles", thèse de doctorat, Université de Metz, 2000.
- [Harzallah et al., 2006] Harzallah M., Berio G., Vernadat F., "Analysis and modelling of competencies: toward better management of human resources", IEEE Transaction on System, Man and Cybernetics, Vol. 36, N°1, pp. 187-207, 2006.
- [Hatchuel et Weil, 2002] Hatchuel A., Weil B., "La théorie C K, Fondement et usage d'une théorie unifiée de la conception", International Conference Sciences of Design, Lyon, 2002.
- [Henderson et Clark, 1990] Henderson R., Clark K., "Architectural innovation: the reconfiguration of existing product technologies and the failure of established firms", Administrative Science Quarterly, Vol. 35, pp. 9-30, 1990.
- [Hermosillo et al., 2002] Hermosillo J., Grabot B., Geneste L., Aguirre O. "Role, skill and knowledge introducing human resources in BPR", 9<sup>th</sup> Int. Multi-Conference on Advanced Computer Systems-Conference on Production System Design, Supply Chain management and Logistics, Pologne, 23-25 octobre. 2002.
- [Hermosillo, 2003] Hermosillo J., "Vers une meilleure prise en compte des ressources humaines dans les processus d'entreprise : Connaissances, Rôles et Compétences", thèse de doctorat, INP de Toulouse, 2003.
- [Hermosillo et al., 2005] Hermosillo Worley J., Chatha K.A., Weston R.H., Aguirre O., Grabot B., "Implementation and optimisation of ERP systems: A better integration of processes, roles, knowledge and user competencies", Computers in Industry, Vol. 56, N°6, pp. 620-638, August 2005.
- [Herroelen et Leus, 2005] Herroelen W., Leus R., "Project scheduling under uncertainty —survey and research potentials", Research report 0225, Department of Applied Economics, K.U. Leuven, European Journal of Operational Research, Vol. 165, pp. 289-306, 2005.
- [Hölttä et Salonen, 2003] Hölttä K., Salonen M., "Comparing three different modularity methods", Proc. Of DETC'03, Design Engineering Technical Conferences, ASME 2003, Chicago, USA, September 2003.
- [Hölttä et al., 2003] Hölttä K., Tang V., Seering W., "Modularizing product architectures using dendrograms", Int. Conf. On Engineering Design, Stockholm, Sweden, August 19-21, 2003.
- [Hölttä, 2005] Hölttä-Otto K., "Modular product platform design", PhD, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, ISBN 951-22-7766-2, 2005.
- [Houé et al., 2006] Houé R., Grabot B., Geneste L., "Competence management for business integration", 12<sup>th</sup> IFAC Symposium on Information Control problems in Manufacturing, INCOM, IFAC/IEEE/IFIP, Saint-Etienne, May 2006.
- [Huang G. et al, 2005] Huang G., Zhang, X., Lo V., "Optimal supply chain configuration for platform products: impacts of commonality, demand variability and quantity discount", I. J. Mass Customisation, Vol. 1, N°1, pp. 107-133, 2005.
- [Huang, 2000] Huang C., "Overview of modular product development", Proc. Natl. Sci. Council, ROC(A), Vol. 24, N°3, pp. 149-165, 2000.
- [Idicula, 1995] Idicula J., "Planning for Concurrent Engineering", Thesis draft, Nanyang Technology University, March, 1995.

- [IEEE 1220] IEEE Std 1220™ - 2005, "Standard for application and Management of the Systems Engineering Process", IEEE Computer Society, Revision of IEEE Std 1220-1998.
- [IPPOP 2001] IPPOP, "Intégration Produit, Processus et Organisation pour l'amélioration de la performance en conception", projet du programme RNTL 2001 (Réseau National des Technologies Logicielles). Site internet IPPOP : <http://ippop.laps.u-bordeaux1.fr/>
- [ISO 15288] ISO 15288: Systems Engineering – System Life Cycle Processes, AFNOR Z 67 288 (Ingénierie systèmes – Processus de cycle de vie des systèmes), November 2003.
- [Jia 1998] Jia T., "Vers une meilleure gestion des ressources d'un groupe autonome de fabrication", thèse de doctorat en sciences de l'ingénieur, Université de Tours 1998.
- [Jiao *et al.*, 1998] Jiao J., Tseng M., Duffy V., Lin F., "Product family modelling for mass customization", I.J. Computers & Industrial Engineering, Vol. 35, N°3-4, pp. 495-498, 1998.
- [Jiao et Tseng, 1999] Jiao J., Tseng M., "An information Modeling Framework for Product Families to support Mass Customization Production", CIRP Annals, Vol. 48, N°1, pp.93-98, 1999.
- [Jiao *et al.*, 2000] Jiao J., Tseng M., Zou Y., "Generic bill of materials and Operations for high-variety production management", Concurrent Engineering: Research and Applications – CERA, Vol. 8, N°4, pp. 297-322, 2000.
- [Jiao *et al.*, 2004] Jiao R., Huang G., Tseng M., "Concurrent Enterprising for Mass Customization", Concurrent Engineering: Research and Applications, Vol. 12, N°2, pp. 83-88, 2004.
- [Jiao *et al.*, 2007] Jiao J., Simpson T.W., Siddique Z., "Product family design and platform-based product development: a state-of-the-art review", Journal of Intelligent Manufacturing, Special issue on Product family design and platform-based product development, Vol. 18, N°1, pp. 5-29, 2007.
- [José et Tollenaere, 2005] José A., Tollenaere M., "Modular and Platform methods for product family design: Literature analysis", Journal of intelligent Manufacturing, Vol. 16, pp. 373-392, 2005.
- [José, 2005] José A., "Contribution aux méthodes de conception modulaire de produits et processus Industriels", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Spécialité Génie industriel, 2005.
- [Jussupova et Probst, 2007] Jussupova-Mariethoz Y., Probst A-R., "Business Concepts Ontology for an enterprise performance and competences monitoring", Computers in industry, Vol. 58, N°2, February 2007, Pages 118-129.
- [Keeney et Raiffa, 1976] Keeney R., Raiffa H., "Decisions with Multiple Objectives, Preferences and Value Trade Offs", John Wiley & Sons, New York, 1976.
- [Keller *et al.*, 2005] Keller R., Eckert C.M., Clarkson P.J., "Visualising change propagation", Proc. 15<sup>th</sup> Int. Conf. On Engineering Design, ICED'05, Melbourne, Australia, 2005.
- [Keraron *et al.*, 2007] Keraron Y., Bernard A., Bachimont B., "An UML model of the technical information system to enable information handling and recording during the product life cycle", Product Lifecycle Management – SP3, Proc. Of the Int. Conf. On PLM, Chapter 6, pp. 363 – 372, 2007.
- [King et Nako 1986 ] King J., V. Nakornchai, "An interactive data-clustering algorithm", Flexible manufacturing system, pp. 285-291, 1986.
- [King, 1980] King J., "Machine-Component Group Formation in Group Technology", OMEGA Journal of Management Science, Vol.8, N°2, pp. 193-199, 1980.
- [Krob et Printz, 2007] Krob D., Printz J., "Tutoriel 1 : Systèmes de systèmes : concepts, problématiques, ingénierie et architecture", Ecole Système de Systèmes, Ministère de la Défense, DGA, [http://www.ep-lix.com/IMG/pdf/Tutoriel\\_1.pdf](http://www.ep-lix.com/IMG/pdf/Tutoriel_1.pdf), 20/03/2007.
- [Kusiak et Huang, 1996] Kusiak A., Huang C., "Development of Modular Products", IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology – part A, Vol. 19, N°4, pp. 523-538, 1996.
- [Kusiak et Wang, 1993] Kusiak A., Wang J., "Efficient organizing of design activities", Int. J. Production Research, Vol. 31, pp. 753–769, 1993.
- [Lamothe *et al.* 2006] Lamothe J., Hadj-Hamou K., Aldanondo M., "An optimization model for selecting a product family and designing its supply chain", European Journal of Operational Research, Vol. 169, N°3, pp. 1030-1047, 2006
- [Larses et Blackenfelt, 2003] Larses O., Blackenfelt M., "Relational reasoning supported by quantitative methods for product Modularization", Int. Conf. On Engineering Design, ICED 03 Stockholm, August 19-21, 2003
- [Le Coq, 2007] Le Coq M., "Approches méthodologiques en conception de produits", mémoire HDR, INPG, 2007.
- [Lefebvre *et al.*, 2002] Lefebvre P., Roos P., Sardas J C., "From the management of expertise to the management of design metier", EURAM Conference, Stockholm, Suède, 2002.
- [Le Moigne 1977] Le Moigne, J.L., "La théorie du système général, Théorie de la modélisation", Paris: Col. Systèmes-Décisions, Presses Universitaires de France, 1977.
- [Ley et Albert, 2003] Ley T., Albert D., "Identifying Employee Competencies in Dynamic Work Domains: Methodological Considerations and a Case Study", J. of Universal Computer Science, Vol. 9, N°12, pp. 1500-1518,

- 2003.
- [Lindemann, 2007] Lindemann U., "A vision to overcome "chaotic" "design for X" processes in early phases", Int. Conf. Engineering Design, ICED'07, 28 – 31 August 2007, Paris.
- [Lombard, 2006] Lombard M., "Contribution de la Modélisation Informationnelle aux Processus de Conception et Réalisation de Produits Manufacturiers : vers une Ontologie Métier", HDR, UHP, Nancy, 2006.
- [Lucia *et al.*, 1999] Lucia, A.D., Lepsinger R., "The art and science of competency models: Pinpointing critical success factors in Organizations". Jossey-Bass 1999.
- [Madni, 2008] Madni A., "Agile Systems Architecting (ASA): placing agility where it counts", Proc. CSER 2008, Conf. On Systems Engineering Research, Paper #253, April 4-5, Los Angeles, USA, 2008.
- [Marquis-Favre *et al.*, 2006] Marquis-Favre W., Bideaux E.; Mechin O., Scavarda S., Guillemard F., Ebalard M., "Mechatronic bond graph modelling of an automotive vehicle", Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, Vol. 12, N°2-3, pp. 189-202, April-June 2006.
- [Martin et Ishii, 2002] Martin M., Ishii K., "Design for variety: developing standardized and modularised product platform architectures", Research in Engineering Design, Vol. 13, pp. 213-235, 2002.
- [McCord et Eppinger, 1993] McCord K., Eppinger, S., "Managing the Integration Problem in Concurrent Engineering", M.I.T. Sloan School of Management, Cambridge, MA, Working Paper no.3594, 1993.
- [Mc Cormick *et al.* 2002] McCormick W.T., Schweitzer P.J., White T.W., "Problem decomposition and data reorganization by a clustering technique", Operations Research, Vol. 20, pp. 993-1009, 2002.
- [Mc Mahon *et al.*, 2004] McMahon C., Lowe A., Culley S., "Knowledge management in engineering design: personalization and codification", Journal of Engineering Design, Vol. 15, N°4, pp. 307-325, 2004.
- [Maier, 1998] Maier M.W., "Architecting Principles for Systems-of-Systems", Systems Engineering, Vol.1, N°4, pp. 267-284, 1998.
- [Meinadier, 1998] Meinadier J.P., "Ingénierie et intégration des systèmes", Hermès, 1998.
- [Meinadier, 2002] Meinadier J-P., "Le métier d'intégration de systèmes", Hermès Sciences Publications, 2002.
- [Menand 2002] Menand S., "Modélisation pour la réutilisation du processus de conception multi acteur de produits industriels", Thèse de Doctorat, Laboratoire GILCO INP Grenoble 2002.
- [Messac *et al.*, 2002] Messac A., Martinez M., Simpson T.W., "Introduction of Product Family Penalty Function Using Physical Programming," ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 124, pp. 164-172, 2002
- [Meyer et Utterback, 1993] Meyer M., Utterback J., "The Product Family and the Dynamics of Core Capability," Sloan Management Review, Vol. 34, N°3, pp. 29-47, Spring 1993.
- [Meyer et Lehnerd, 1997] Meyer M., Lehnerd A., "The Power of Product Platforms – building value and cost leadership", The Free Press, New York, NY, 1997.
- [Micaëlli et Forest, 2003] Micaëlli J.P., Forest J., "Artificialisme, Introduction à une théorie de la conception", PPUR, Lausanne, 2003.
- [Midler, 1993] Midler C., "L'auto qui n'existait pas - Management de projet et transformations de l'entreprise", InterEditions, Paris, 1993.
- [Mille, 2006] Mille A., "From case-based reasoning to traces-based reasoning", Annual Reviews in Control, Vol. 30, N°2, pp. 223-232, 2006.
- [Morelli *et al.*, 1995] Morelli M., Eppinger S., Gulati R., "Predicting technical communication in product development organizations", IEEE Trans. Eng. Management, Vol. 42, pp. 215-222, Aug. 1995.
- [Morin, 1977] Morin. E., "La Méthode 1 – La Nature de la Nature", Paris, Seuil, 1977.
- [Morin, 1992] Morin E., "Introduction à la pensée complexe", Paris, ESF, 1992.
- [Mosheiov, 2001] Mosheiov G., "Scheduling problem with learning effect", European Journal of Operational Research, Vol. 13, pp.687–693, 2001.
- [Nembhard, 2001] Nembhard D.A., "Heuristic approach for assigning workers to tasks based on individual learning rates", International Journal of Production Research, Vol. 39, N°9, pp. 1955-1968, 2001.
- [Nembhard *et al.*, 2002] Nembhard A.D., Osothsilp N., "Task complexity effects on between-individual learning/forgetting variability", International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 29, N°1, pp. 297-306, 2002.
- [Newcomb *et al.*, 1998] Newcomb P., Bras B., Rosen D., "Implications of modularity on product design for the life cycle", Journal of Mechanical Design, Vol. 120, pp. 483-490, 1998.
- [Nightingale, 2000] Nightingale P., "The Product-process-Organization relationship in complex development projects", Res. Policy, Vol. 29, pp. 913-930, 2000.
- [Oget et Sonntag, 2001] Oget D., Sonntag M., "Aspects cognitifs et conatifs de la compétence collective", 4ème congrès international de Génie Industriel, Marseille, 12-15 juin 2001.
- [OMG, 2007] Object Management Group, OMG Systems Modeling Language (OMG SysML™), V1.0, OMG Available Specification, <http://www.omg.org/spec/SysML/1.0/PDF>, 2007.

- [Oosterman, 2001] Oosterman B. "Improving Product Development Projects by Matching Product Architecture and Organization", PhD thesis, Gröningen University, The Netherlands, ISBN: 90-72591-99-2, 2001.
- [Ostrosi *et al.*, 2003] Ostrosi E., Ferney M., Garro O., "A Fractal-based Approach for Concurrent Engineering", International Journal of Concurrent Engineering: Research and Applications, Sage Publications, Vol. 11, N°4, pp. 249-265, 2003.
- [Otto et Wood, 2001] Otto, K., Wood, K., "Product design: techniques in reverse engineering and new product development", Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2001.
- [Ouazzani, 1999] Ouazzani A. "Représentation dynamique du processus de conception : une perspective de capitalisation de l'historique de conception", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, France, 1999.
- [Pahl et Beitz, 1984] Pahl G., Beitz W., (edited by K. Wallace), "Engineering design: a systematic approach", London: Springer, 1<sup>st</sup> Edition, 1984.
- [Pahl et Beitz, 1996] Pahl G., Beitz W. (edited by K. Wallace), "Engineering Design: a Systematic Approach", Springer Verlag, London, 2<sup>nd</sup> Edition, 1996.
- [Panetto, 2006] Panetto H., "Meta-modèles et modèles pour l'intégration et l'interopérabilité des applications d'entreprises de production", HDR, spécialité génie informatique, Univ. Henry Poincaré, Nancy I, 2006.
- [Pawlak, 1982] Pawlak Z., "Rough Sets", Information Journal of Information and Computer Sciences, Vol. 11, N°5, pp. 341-356, 1982.
- [Penalva, 1997] Penalva J.M., "la modélisation par les systèmes complexes", thèse de doctorat, Univ. de Paris Sud, décembre 1997.
- [Pépiot, 2005] Pépiot G., "Méthodologie des entreprises sur la base des compétences", thèse de doctorat en génie mécanique, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005.
- [Perrard *et al.*, 2007] Perrard C., Lutz P., Salgueiro P., "New bottom-up algorithm for assembly plan generation: opportunities for micro-factory design", International Symposium on Assembly and Manufacturing, ISAM'07, IEEE, pp. 276-281, 22-25 July 2007.
- [Perrin, 1999] Perrin J., "Pilote et évaluation des processus de conception", L'harmattan, 1999.
- [Pimmler et Eppinger, 1994] Pimmler T., Eppinger S., "Integration Analysis of Product Decompositions", Proc. ASME Design Theory and Method Conference (DTM'94), Vol. 68, pp. 343-351, 1994.
- [Porter, 1986] Porter M., "L'avantage concurrentiel", InterEditions, Paris, 1986
- [Pralhad *et al.*, 1990] Prahalad C.K., Hamel G., "The core competence of the corporation", Harvard Business review, pp 79-91, may-june 1990.
- [Prasad, 1997] Prasad B., "Concurrent Engineering Fundamentals", Vol. 1-2, Prentice Halls, 1997.
- [Probst et Ulrich, 1989] Probst, G., Ulrich, H., "Pensée globale et management", Paris: Les Ed. d'Organisation, 1989.
- [Rabardel et Pastré, 2005] Rabardel P., Pastré P. (dirigé par), "Modèles du sujet pour la conception. Dialectiques activités développement", Toulouse : Octarès, 2005.
- [Rakotondrabe, 2006] Rakotondrabe M., "Développement et Commande Modulaire d'une Station de Microassemblage", thèse de doctorat, Spécialité Automatique, Université de Franche-Comté, 2006.
- [Rault, 1993] Rault-Jacquot V., "Contribution à la valorisation du patrimoine technologique de l'entreprise : Proposition d'une approche de l'inventaire et de l'évaluation des compétences", thèse de doctorat en génie industriel, I.N.P. Loraine, Nancy 1993.
- [Renaud *et al.*, 2003] Renaud J., Thibault J., Zaras K., Lanouette R., Fournier F., Fonteix C., "Decision making by rough sets applied to chemical and biochemical processes multicriteria optimization", 12<sup>th</sup> International Conference on Management of Technology, Nancy, May 13-15, 2003.
- [Renaud *et al.*, 2007] Renaud J., Chebel Morello B., Fuchs B., Lieber J., "Raisonnement à partir de cas", Traité IC2, série Informatique et systèmes d'information, 2 tomes. Février 2007.
- [Rose *et al.*, 2006] Rose B., Robin V., Caillaud E., Girard P., "Comment répondre aux challenges de la gestion des compétences en conception collaborative de produit ?", La Semaine de la Connaissance, groupe C2EI, Nantes 26-30 juin 2006.
- [Rosen, 1996] Rosen D.W., "Design of modular product architectures in discrete design spaces subject to life cycle issues", ASME Design Automation Conference, Irvine, CA, 96-DETC/DAC-1485, 1996.
- [Roy et Bouyssou, 1993] Roy B., Bouyssou D., "Aide multicritère à la décision : méthodes et études de cas", Paris Economica, 1993.
- [Sage et Cuppan, 2001] Sage A., Cuppan C., "On the Systems Engineering and Management of Systems of Systems and Federations of Systems", Information, Knowledge, and Systems Management, Vol. 2, pp. 325-345, 2001.
- [Sako, 2002] Sako M., "Modularity and outsourcing: the nature of co-evolution of product architecture and



- organisation architecture in the global automotive industry", In "The Business of Systems Integration" (Editors. Andrea Prencipe *et al.*), Oxford University Press, 2002.
- [Saaty, 1990] Saaty T., "How to make a decision. The Analytic Hierarchy Process", European Journal of Operational Research, Vol. 48, pp. 9-26, 1990.
- [Sanchez and Mahomey, 1996] Sanchez R., Mahomey J.T., "Modularity, flexibility and knowledge management in product and organization design", Strategic Management Journal, Vol. 17, pp. 63-76, 1996.
- [Sanchez *et al.*, 1996] Sanchez R., Heene A., Thomas H., "Dynamics of Competence-based Competition", Elsevier, 1996.
- [Sanchez, 1999] Sanchez R., "Modular architectures in the marketing process", Journal of Marketing, Vol. 63, pp. 92-112, 1999.
- [Schmidt, 2002] Schmidt K., "The problem with "awareness": Introductory remarks on "awareness in CSCW", Computer Supported Cooperative Work (CSCW): The Journal of Collaborative Computing, Vol. 11, N°3-4, pp. 285-298, 2002.
- [Searle, 1998] Searle J., "La construction de la réalité sociale", Jacob, Paris, 1998.
- [Senechal, 2004] Senechal O., "Pilotage des systèmes de production vers la performance globale", HDR, Université de Valenciennes (UVHC), 2004.
- [Senturia, 2001] Senturia S.D., "Microsystem Design", Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [Sered et Reich, 2006] Sered Y., Reich Y., "Standardization and modularization driven by minimizing overall process effort", Computer-Aided Design, Vol. 38, pp. 405-416, 2006.
- [Sharman et Yassine, 2004] Sharman D., Yassine A., "Characterizing Complex Product Architectures", Systems Engineering Journal, Vol. 7, N°1, pp. 35-60, 2004,
- [Shen *et al.*, 2006] Shen, W., Chao, K.M., Lin, Z., Barthès, J-P., James, A., "Computer Supported Cooperative Work in Design II", Lecture Notes in Computer Science 3865, Springer (ISBN: 978-3-540-32969-5), 2006.
- [Siddique et Rosen, 1998] Siddique Z., Rosen D., "On the applicability of product variety design concepts to automotive platform commonality", Proc. of the 1998 ASME Design Engineering Technical Conferences, Atlanta, 1998.
- [Siddique et Rosen, 1999] Siddique Z., Rosen D., "Product platform design: A graph grammar approach", Proc. ASME Design Engineering Technical Conferences, Las Vegas, Nevada, DETC99/DTM-8762, 1999
- [Siddique, 2000] Siddique Z., "Common platform development: designing for product variety", Ph.D Thesis, Georgia Institute of Technology, USA, 2000.
- [Siddique et Rosen, 2001] Siddique Z., Rosen D., "On discrete design spaces for the configuration design of product families", Artificial Intelligence in Engineering, Design, Automation, and Manufacturing, Vol. 15, pp. 1-18, 2001.
- [Simon, 1997] Simon H.A., "Sciences des systèmes, Sciences de l'artificiel", version traduite en français par J.L. Le Moigne, Dunod, 1997.
- [Simpson, 1998] Simpson T.W., "A concept exploration method for product family design", Ph.D Thesis, Woodruff School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, 1998.
- [Simpson *et al.*, 2001] Simpson T.W., Maier J.R.A., Mistree F., "Product platform design: method and application", Research In Engineering Design, Vol. 13, pp. 2-22, 2001.
- [Simpson, 2004] Simpson T.W., "Product platform design and customization: status and promise", Special issue: Platform product development for mass customization", AI EDAM, Vol. 18, pp. 3-20, Cambridge University Press, 2004.
- [Simpson *et al.*, 2005] Simpson T.W., Siddique Z., Jiao J., (Ed.), "Product platform and product family design: methods and applications, Kluwer Academic Publishers, New York, 2005.
- [Simpson *et al.*, 2006] Simpson T.W., Marion T., De Weck O., Hölttä-Otto K., Kokkolaras M., Shooter S., "Platform-based design and development: current trends and needs in industry", Proc. of ASME 2006 International Design Engineering Technical Conferences, Sept. 10-13, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2006.
- [Sinha, 2004] Sinha N., "Modeling for Effective Computer Support to MEMS Product Development", Msc Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 2004
- [Sohnius *et al.*, 2007] Sohnius R., Jentzsch E., and Matzke W., "Holonc Simulation of a Design System for Performance Analysis", Lecture Notes in Computer Science, Vol. 4659, Book: "Holonc and Multi-Agent Systems for Manufacturing", pp. 447-454, 2007.
- [Sonnenwald, 1996] Sonnenwald D., "Communication roles that support collaboration during the design process", Design studies, Vol. 17, pp 277-301, 1996.
- [Sosa *et al.*, 2003] Sosa M., Eppinger S., Rowles C. "Identifying modular and integrative systems and their impact on design team interactions", Transactions of the ASME, Vol. 125, pp. 240-252, 2003.
- [Sosa *et al.*, 2004] Sosa M., Eppinger S., Rowles C., "The Misalignment of Product Architecture and Organizational Structure in Complex Product Development", Management Science, Vol. 50, N°12, pp. 1674-1689,

- 2004.
- [Sosa *et al.*, 2007a] Sosa M., Eppinger S., Rowles C., "A Network Approach to Define Modularity of Components in Complex Products", ASME Journal of Mechanical Design, forthcoming 2007
- [Sosa, 2007b] Sosa M., "Aligning Process, Product, and Organizational Architectures in Software Development", Int. Conf. Engineering Design, ICED'07, 28-31 August 2007, Paris.
- [Spencer *et al.*, 1993] Spencer L.M., Spencer S.M., "Definition of competency", Chap. 2 In "Competence at Work, Models for Superior Performance", John Wiley and Sons inc, pp 9-16, 1993.
- [Stadzisz, 1997] Stadzisz P., "Contribution à une méthodologie de conception intégrée des familles des produits pour l'assemblage". Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 1997.
- [Stenlund *et al.*, 1999] Stenlund K.L., Hörte S.A., "Competence accounting – methods for measuring and valuing key competencies" European Operations Management Association VI International Annual Conference "Managing Operations Networks", Venice, Italy, 7-8 June 1999.
- [Steward D., 1981] Steward D., "The Design Structure System: A Method for Managing the Design of Complex Systems", IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. 28, pp. 71-74, 1981.
- [Stickley et Grabot 1994] Stickley A., Grabot B., "Fuzzy logic in team design", Proceedings of IFIP WG 5.7, Conference, Benchmarking Theory and Practice, Trondheim, June 16-18, 1994.
- [Stone *et al.*, 1998] Stone R., Wood K., Crawford R., "A Heuristic Method to Identify Modules from a Functional Description of a Product", Proc. of DETC98 DETC98/DTM-5642 Atlanta, GA ,1998.
- [Stone *et al.*, 2000] Stone R., Wood K. and Crawford R. A Heuristic Method for Identifying Modules for Product Architectures. Design Studies, Vol. 21, pp.5-31, 2000.
- [Stone *et al.*, 2004] Stone R., McAdams D., Kayyalethekkel V. "A product architecture-based conceptual DFA technique", Design Studies, Vol. 25, N°3, pp. 301-325, May 2004.
- [Sudjianto et Otto, 2001] Sudjianto A., Otto, K., "Modularization to support multiple brand platforms", Proc. of ASME Design Engineering Technical Conferences, Pittsburgh, PA.September 9-12, 2001.
- [Suh, 1990] Suh, N., "Principles of Design", Oxford University Press, Cambridge, UK, 1990.
- [Tang *et al.*, 2000] Tang Dunbing, Zheng L., Lia Z., Lib D., Zhang S., "Re-engineering of the design process for concurrent engineering", I.J. of Computers & Industrial Engineering, Vol. 38, pp 479-491, 2000.
- [Thebaud, 2001] Thebeau R., "Knowledge Management of System Interfaces and Interactions for Product Development Processes", Masters Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [Theureau, 2006] Theureau J., "Le Cours d'action : méthode développée", Octarès, Toulouse, 2006.
- [Torkkeli et Tuominen 2002] Torkkeli M., Tuominen M., "The contribution of technology selection to core competencies", International Journal of Production Economics, Vol. 77, pp.271-284, 2002.
- [Trassaert, 2002] Trassaert P., "Concevoir le produit, l'organisation et la stratégie - le métier de systémier", Int. Conf. Sciences of Design, Lyon, in honour of Herbert Simon, 2002.
- [Tsai *et al.*, 2003] Tsai H-T., Moskowitz H., Lee L-H., "Human resource selection for software development projects using Taguchi's parameter design", European Journal of Operational Research, Vol. 151, pp 167-180, 2003.
- [Tseng *et al.*, 2004] Tseng T., Huang C., Chu H., Gung, R., "Novel approach to multi-functional project team formation", International Journal of Project Management, Vol. 22, pp. 147-159, 2004
- [Turner, 2007] Turner R., "Toward agile Systems Engineering processes", The Journal of Defense Software Engineering, <http://www.stsc.hill.af.mil/crosstalk/2007/04/0704Turner.html>, April 2007.
- [Ulrich et Tung, 1991] Ulrich K., Tung K., "Fundamentals of product modularity", Proc. of ASME Winter Annual Meeting Symposium on Design and Manufacturing Integration. pp.73-79. Atlanta, GA. November 1991.
- [Ulrich, 1995] Ulrich K., "The role of product architecture in the manufacturing firm". Research Policy, Vol. 24, pp. 419-440, 1995.
- [Ulrich et Eppinger, 2000] Ulrich K., Eppinger S., "Product Design & Development", 2<sup>nd</sup> Ed. McGraw-Hill, New York, 2000.
- [Van Wie *et al.*, 2001] Van Wie M., Greer J., Campbell M., Stone R., Wood K., "Interfaces and product architecture", ASME Design Engineering Technical Conference Proc., DETC01/DTM-21689, 2001.
- [Vaudelin et Devise, 2004] Vaudelin J.P., Devise O., "L'homme dans l'organisation : compétences individuelles et compétences collectives", Workshop AMOEP, Performance industrielle, 2 décembre 2004, Thones, <http://www.ifma.fr/AMOEP/Les%20actes.pdf> .
- [VDI 2206] VDI Richtlinie 2206: "Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme", Düsseldorf: VDI Verlag, 2004 06.
- [VDI 2221] VDI Richtlinie 2221: "Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte". Düsseldorf: VDI Verlag, Mai 1993.
- [Vergnaud 1998] Vergnaud G., "Au fond de l'action, la conceptualisation" In J.M Barbier, Savoirs théoriques et savoirs

- d'action, Education et formation, PUF, Paris, pp 275-292, 1998.
- [Vernadat 1999] Vernadat F., "Techniques de Modélisation en Entreprise. Applications aux processus opérationnels", Economica, 1999.
- [Vidal *et al.*, 2002] Vidal-Gomel C., Samurçay R., "Qualitative analyses of accidents and incidents to identify competencies", The electrical systems maintenance case", Safety Science, Vol. 40, pp 479-500, 2002.
- [Von Bertalanffy, 1968] Von Bertalanffy L. "General System Theory: Foundations, Development, Applications", New York, 1968: George Braziller. Traduction (1973) : Théorie générale des systèmes, Paris, Bordas (Dunod).
- [Walsh et Linton 2002] Walsh S., Linton J.D., "The measurement of technical competencies", Journal of High Technology Management Research, Vol. 13, pp.63-86, 2002.
- [Warfield, 1973] Warfield J., "Binary Matrices in System Modeling", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 3, pp. 441-449, 1973.
- [Watty et Binz, 2007] Watty R. and Binz H., "Methodology for the development of micro-electro-mechanical-systems", Int. Conf. Engineering Design, ICED'07, 28 – 31 August 2007, Paris.
- [Wheelwright et Clark, 1992] Wheelwright S., Clark K., "Revolutionizing Product Development: Quantum Leaps in Speed, Efficiency, and Quality", Free Press, New York, NY, 1992.
- [Whitfield *et al.*, 2002] Whitfield R.I., Smith J.S., Duffy A., "Identifying Component Modules", Proc. of Seventh International Conference on Artificial Intelligence in Design (AID'02), Cambridge, United Kingdom, pp. 571-592, 15-17 July 2002.
- [Whitfield *et al.*, 2005] Whitfield R.I., Duffy A., Gartzia-Etxabe L., "Identifying and evaluating parallel design activities using Design Structure Matrix", Proc. ICED 05 Melbourne, August 15-18, 2005
- [Yager, 1988] Yager R., "On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 18, pp.183-190, 1988.
- [Yannou, 2001] Yannou B., "Préconception de produits", Habilitation à Diriger les Recherches, HDR, Institut National Polytechnique de Grenoble, soutenue à l'Ecole Centrale Paris, 2001.
- [Yassine et Braha, 2003] Yassine A., Braha D., "Complex concurrent engineering and Design Structure Matrix method", Concurrent Engineering: Research and Applications, Vol. 11, N°3, pp. 165-176, 2003.
- [Yassine et Wissmann 2007] Yassine A., Wissmann L., "The Implications of Product Architecture on the Firm", Journal of Systems Engineering, Vol. 10, N°2, pp.118-137, Summer 2007.
- [Yu J. *et al.*, 1999] Yu J., Gonzalez-Zugasti J.P., Otto K., "Product architecture definition based upon customer demands", Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, Vol. 121, N°3, pp. 329-335, 1999.
- [Yu T. *et al.*, 2003] Yu T., Yassine A., Goldberg D., "Genetic algorithm for developing modular product architectures", Proc. ASME 15th Int. Conf. Design Theory Methodology, Chicago, September, 2003
- [Yu T. *et al.*, 2007] Yu T., Yassine A., Goldberg A., "An information theoretic method for developing modular architectures using genetic algorithms", Research in Engineering Design, Vol. 18, N°2, pp. 91-109, 2007.
- [Zakarian et Kusiak, 1999] Zakarian A., Kusiak A., "Forming teams: an analytical approach", IIE Transaction, Vol. 31, N°1, pp. 85-97, 1999.
- [Zamirowski et Otto, 1999] Zamirowski E., Otto K., "Identifying product family architecture modularity using function and variety heuristics", Proc. ASME Design Engineering Technical Conferences, Las Vegas, NV. 1999.
- [Zha et Sriram, 2006] Zha X.F., Sriram R.D., "Platform-based product design and development: A knowledge-intensive support approach", Knowledge-Based Systems, Vol. 19, pp. 524-543, 2006.
- [Zha et Du, 2006] Zha X., Du H., "Knowledge-intensive collaborative design modeling and support- Part I: Review, distributed models and framework", Computers in Industry, Vol. 57, pp. 39-55, 2006.
- [Zha et al. 2005] Zha X.F., Sriram R.D., Gupta S.K., "Information and knowledge modeling for computer supported micro electro-mechanical systems design and development", Proc. of DETC'2005, ASME Design Engineering Technical Conference, California, USA, September 24-28, 2005

# Liste des figures

Figure 1 : Structure générale du document .....	3
Figure 2: Positionnement de la conception architecturale .....	18
Figure 3: Les domaines du projet.....	18
Figure 4: Cartographie de nos travaux de recherche .....	19
Figure 5: Charges d'enseignement entre 1998 et 2007, et prévision pour 2007-2008.....	32
Figure 6: Exemple de matrice de couplage.....	44
Figure 7: Processus de développement de produits (d'après VDI 2221).....	45
Figure 8 : Différents thèmes de recherche en conception.....	51
Figure 9 : Positionnement global de notre recherche.....	55
Figure 10 : Allocation des fonctions aux constituants [Meinadier, 2002].....	69
Figure 11 : Exemple de graphe non orienté et représentation sous forme de DSM .....	73
Figure 12 : Exemple de représentation d'une architecture .....	73
Figure 13 : Exemple de matrice d'incidence .....	75
Figure 14 : Modélisation multi-domaines.....	75
Figure 15 : Représentation par MDM (Multi-Domain Mapping) [Lindemann, 2007].....	76
Figure 16 : Exemple de calcul du coefficient MSI .....	77
Figure 17 : Couplage entre l'architecture du produit et l'organisation du projet.....	81
Figure 18 : Correspondance entre les domaines du projet et les différents sous-systèmes de la conception.....	82
Figure 19 : Exemple d'utilisation de l'algorithme .....	85
Figure 20 : DSM au pas 1 et 2 puis DSM au pas 4.....	85
Figure 21 : Couplage entre deux couples de domaines différents .....	92
Figure 22 : Propagation de couplages .....	92
Figure 23 : Propagation de couplages (cas où $A_i \neq A_j$ ).....	92
Figure 24 : Cas où $A_i = A_j$ .....	92
Figure 25 : Explication des règles 2 et 3 dans le cas de l'architecture du produit .....	93
Figure 26 : Architecture du traitement flou dans le cas des domaines FS et CP. ....	95
Figure 27 : Architecture simulée du domaine des composants.....	96
Figure 28 : Architecture attendue du domaine des composants construite par les architectes .....	96
Figure 29 : Représentation de la SGP d'une famille de meuble "Partie Basse Une Porte Un Tiroir" .....	100
Figure 30 : Graphe encapsulé du produit de base .....	101
Figure 31 : Graphe encapsulé du module distinctif "Caisson Tiroir à Frein Tiroir" et "Caisson Tiroir à Coulisser Standard" .....	102
Figure 32 : Production $p_{CT\_FT}$ représentant l'ajout du module "Caisson Tiroir à Frein Tiroir" .....	103
Figure 33 : Diagramme de contrôle .....	104
Figure 34 : Représentation d'une organisation en équipes.....	114
Figure 35 : Structure générale des contributions .....	123
Figure 36 : Logique ternaire de la performance.....	124
Figure 37 : Modélisation selon l'IS .....	124
Figure 38 : Articulation entre les processus de conception et de développement de compétences.....	126
Figure 39 : Modèle récursif d'un acteur collectif sur plusieurs niveaux .....	128
Figure 40 : Réseau de valeur stratégique adapté à l'ingénierie système .....	129
Figure 41 : Structure générale de la méthode de caractérisation .....	132
Figure 42 : Structure de la méthode de constitution d'équipes .....	135
Figure 43 : Regroupement de tâches et acteurs .....	136
Figure 44 : Affectation des tâches aux acteurs .....	136
Figure 45 : DSM-connaissances pour structurer un acteur Métier .....	138

Figure 46 : Exemple de qualification d'une compétence d'architecte de boîte de vitesse.....	140
Figure 47 : Méthode de déploiement d'une prestation stratégique vers les compétences des concepteurs.....	141
Figure 48 : Architecture d'une "DSM Acteur" du projet de conception d'une boîte de vitesse robotisée .....	141
Figure 49 : Structure de la méthode de coévolution des architectures.....	150
Figure 50 : Architecture finale du produit, après <i>clustering</i> de la DSM( $P_f$ ) .....	151
Figure 51 : Architecture finale de la DSM Acteur, après <i>clustering</i> .....	151
Figure 52 : Optimisation de l'architecture des acteurs de conception .....	153
Figure 53 : Architecture des acteurs après <i>clustering</i> des $DSM_{opt}(A)_{(\lambda)}$ .....	155
Figure 54 : Architecture du produit après <i>clustering</i> de $DSM_{sim}(P)_{(\lambda=50)}$ .....	156
Figure 55 : Vers une conception collaborative "consciente" .....	160
Figure 56 : Vers un couplage structurel .....	162
Figure 57 : Vers un système de systèmes de conception .....	163
Figure 58 : Moyenne et écart type des "erreurs de sortie" en fonction de $\sigma$ .....	188
Figure 59 : Matrices fictives : DSM FS et IM FS-CP .....	189
Figure 60 : Deux représentations de l'architecture de référence .....	190
Figure 61 : Nombre moyen d'éléments changeant de cluster, en fonction de $p$ .....	190
Figure 62 : Articulation entre processus, mission, activité et compétence .....	193

# Liste des tableaux

---

Tableau 1 : Contributions scientifiques et contextes industriels.....	22
Tableau 2 : Synthèse des relectures de communications.....	26
Tableau 3 : Mode de financement des thèses et situation des docteurs.....	27
Tableau 4 : Volumes horaires effectués par niveau de formation.....	33
Tableau 5 : Volumes horaires effectués par type de matières enseignées.....	33
Tableau 6 : Le pilotage des compétences - vision "réservoir" ou vision "potentiel".....	54
Tableau 7 : Positionnement de nos thématiques de recherche.....	60
Tableau 8 : Positionnement national de notre recherche.....	62
Tableau 9 : Différents types de DSM et leurs applications.....	74
Tableau 10 : Notations.....	77
Tableau 11 : Notations de l'algorithme de clustering.....	86
Tableau 12 : "Fonction objectif" de l'algorithme de Thebaud.....	86
Tableau 13 : Modification apportée à la "fonction objectif".....	87
Tableau 14 : Coefficients correcteurs.....	87
Tableau 15 : Seconde modification apportée à la "fonction objectif".....	87
Tableau 16 : Calcul d'un indice de couplage.....	88
Tableau 17 : Comparaison de la reproductibilité des deux algorithmes.....	89
Tableau 18 : Comparaison qualitative entre des algorithmes de clustering.....	89
Tableau 19 : Liste des FS et des composants avec leurs abréviations.....	94
Tableau 20 : DSM FS et MI FS-CP numériques.....	94
Tableau 21 : Estimation qualitative des exigences et risques associés.....	98
Tableau 22 : Bilan quantitatif de la partie IV.....	105
Tableau 23 : Synthèse de l'état de l'art sur la constitution d'équipe.....	115
Tableau 24 : Exemples de dialogues.....	120
Tableau 25 : Une évolution du questionnement sur les quatre phases du projet.....	125
Tableau 26 : Estimation qualitative.....	134
Tableau 27 : Estimation qualitative de la méthode.....	137
Tableau 28 : Bilan quantitatif des contributions de la partie V.....	142
Tableau 29 : Correspondance entre concepts du CBR et concepts cognitifs.....	144
Tableau 30 : Notations concernant le projet de conception d'une boîte de vitesse robotisée.....	150
Tableau 31 : Estimation qualitative de l'optimisation de l'architecture des acteurs.....	157
Tableau 32 : Bilan quantitatif des résultats récents.....	157



# Résumé

---

## **Contributions à l'instrumentation du métier d'architecte système : de l'architecture modulaire du produit à l'organisation du système de conception**

Ce mémoire constitue une synthèse de nos activités de recherche, d'animation scientifique, d'enseignement et de responsabilité pédagogique entre 1998 et 2008.

Depuis une dizaine d'années, les concepteurs de systèmes mécatroniques doivent satisfaire des exigences de plus en plus sévères et nombreuses. Pour cela, ils doivent créer des solutions qui tendent à se complexifier, pour porter de multiples fonctions de service ou intégrer les dernières technologies innovantes. La conception d'un système mécatronique passe par la conception architecturale qui réalise l'identification de l'architecture du système. Cette activité requiert l'implication d'un métier émergent et stratégique : l' "architecte système". En même temps que l'ingénierie technique, l'architecte système doit assurer l'ingénierie organisationnelle de la conception, c'est-à-dire, définir une organisation adéquate du système de conception. Ce double rôle est critique lors de la phase de conception préliminaire, car les décisions prises auront un impact fort sur les performances de l'ensemble du projet.

La finalité de nos travaux est de développer des modèles, méthodes et outils d'aide à la décision permettant de supporter les activités à la fois technique et organisationnelle d'un architecte système. L'originalité majeure de notre projet réside dans le couplage que nous recherchons entre les architectures du système-produit, du système-projet et du système de compétences de conception.

Nous avons structuré nos contributions selon trois thématiques et répondu aux questions suivantes :

T1 - Identification d'une architecture modulaire du produit : comment identifier une architecture modulaire ? Comment modéliser l'architecture d'une famille de produits et générer la diversité ?

T2 - Organisation du système de conception : comment constituer des équipes compétentes ? Comment piloter les systèmes de compétences ?

T3 - Co-conception des architectures produit-projet : Comment propager des évolutions des modules du produit vers l'organisation du système de conception ? Comment coupler l'architecture du produit et l'organisation du système de conception ?

Les perspectives proposées concernent les 3 thématiques de notre projet, ainsi que quatre extensions possibles :

- 1) Vers une conception collaborative consciente,
- 2) Vers une performance durable du système de conception,
- 3) Vers un système agile de systèmes de conception,
- 4) Vers une conception intégrée de systèmes micro-mécatroniques.



# HABILITATION à DIRIGER des RECHERCHES

**Eric BONJOUR**

Ingénieur ENSMM, Docteur de l'Université de Franche-Comté,  
Rattaché à l'  
Université de Franche-Comté, UFR Sciences et Techniques,  
Institut FEMTO-ST / Département AS2M

---

## **Contributions à l'instrumentation du métier d'architecte système : de l'architecture modulaire du produit à l'organisation du système de conception**

---

Présentée à l'Université de Franche-Comté le 17 novembre 2008  
devant le jury composé de Messieurs :

### ***Président***

**Gérard Morel**, Professeur ..... Univ. Henri Poincaré - Nancy 1

### ***Rapporteurs***

**Michel Aldanondo**, Professeur ..... Ecole des Mines - Albi-Carmaux

**Améziane Aoussat**, Professeur ..... ENSAM - Paris

**Bernard Grabot**, Professeur ..... ENIT - Tarbes

### ***Examineurs***

**Emmanuel Caillaud**, Professeur ..... Univ. Louis Pasteur - Strasbourg 1

**Nicolas Chaillet**, Professeur ..... Université de Franche-Comté

**Dominique Loise**, Resp. pôle Processus de développement GMP ..... PSA Peugeot Citroën

## **Partie VIII.      ANNEXES**

## Sommaire des annexes

---

<b>PARTIE VIII. ANNEXES .....</b>	<b>183</b>
ANNEXE 1. CARTOGRAPHIE DES PRINCIPAUX LABORATOIRES DE RECHERCHE TRAVAILLANT SUR L'ARCHITECTURE MODULAIRE D'UN PRODUIT .....	185
ANNEXE 2. PARTICULARITES DE LA CONCEPTION DES ORGANES AUTOMOBILES .....	186
ANNEXE 3. ANALYSE DE SENSIBILITE DE LA METHODE DE PROPAGATION .....	188
ANNEXE 4. DEFINITIONS DE CONCEPTS CLES POUR LA MODELISATION DES ACTIVITES DE CONCEPTION .....	191
ANNEXE 5. [R.5] .....	195
ANNEXE 6. [R.7] .....	197
ANNEXE 7. [R.8] .....	199
ANNEXE 8. [R.10] .....	201
ANNEXE 9. [R.11] .....	203

## Annexe 1. Cartographie des principaux laboratoires de recherche travaillant sur l'architecture modulaire d'un produit

NB : Cette liste de laboratoires et de chercheurs ne prétend pas être exhaustive. Elle reprend les noms fréquemment cités en bibliographie, pour situer les laboratoires auxquels ils appartiennent.

### ➤ En Amérique (USA et Canada) :

- Massachussets Institute of Technology (M.I.T), Engineering System Division (S. Eppinger, D. Braha, D. Whitney, J. Utterback, E. Crawley, ...), Center for Innovation in Product Development (CIPD, Director: C. Magee) at the MIT Sloan School, Cambridge, USA
- University of Illinois at Urbana, Department of Industrial and Enterprise Systems Engineering, USA (A. Yassine)
- Pennsylvania State University, USA, Department of Industrial & Manufacturing Engineering, USA (T. Simpson ; collaboration avec F. Alizon)
- University of Missouri – Rolla, USA (R. Stone, M. Van Wie)
- University of Texas, Austin, USA (K. Wood, S. Gupta)
- Texas Christian University, Fort Worth (T. Browning)
- University of Pennsylvania – Philadelphia, USA (K. Ulrich)
- University of Oklahoma, USA (Z. Siddique)
- Ecole Polytechnique de Montréal, groupe Polygistik (B. Agard)

### ➤ En Asie :

- Nanyang Technological University, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Singapour, (J. Roger Jiao)
- Hong Kong University of Science and Technology, Department of Industrial Engineering and Engineering Management (M. Tseng), Department of Industrial and Manufacturing Systems Engineering (G. Huang)

### ➤ En France :

- INSEAD, Fontainebleau, France, (M. Sosa, qui a réalisé son PhD avec S. Eppinger au MIT) et Singapour (M. Pich)
- UTBM, M3M (E. Ostrosi, M. Ferney, O. Garro, E. Deciu)
- ENSMM/UFC, FEMTO-ST (JM. Henrioud, M. Dulmet)
- INPG, Grenoble (M. Tollenaere, encadrement des thèses de Bruno Agard en 2002 et Alberto José en 2005)
- Ecole des Mines d'Albi-Carnaux (M. Aldanondo, J. Lamothe, K. Hadj-Hamou)

### ➤ En Europe :

- University of Cambridge, Engineering Design Center, United Kingdom (C. Eckert, J. Clarkson, K. Wallace)
- Helsinki University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Espoo, Finland, thèse de Hölttä-Otto, 2005 en co-tutelle avec le M.I.T, CIPD (Hölttä travaille maintenant à l' University of Massachussets) ; Department Machine Design (E. Coatanea)
- Royal Institute of Technology, Stockholm (M. Blackenfelt, O. Larses, M. Danilovic)
- International Institute for Management Development, Lausanne (Ron Sanchez, Professor of Strategy and Technology Management)
- Technische Universität München, Munich (M. Maurer, U. Lindemann)

## Annexe 2. Particularités de la conception des organes automobiles

Le projet mené pour PSA concernait les organes automobiles (liaison au sol, groupe motopropulseur (GMP) et adaptation au véhicule). Les organes sont des artefacts compliqués ( $10^4$  composants,  $10^3$  contraintes, des délais de conception de l'ordre de  $10^2$  jours, etc.) et complexes ( $10^2$  métiers, donc vues, modèles, etc., requis). Ils contribuent fortement aux prestations distinctives du constructeur : consommation, pollution, fiabilité sur le cycle de vie, sécurité, agrément de conduite, confort, etc., et au coût de production du produit (au moins 15%, avec une part croissante à mesure qu'on monte en gamme). Leur conception présente les caractéristiques suivantes.

[1] Elle est contrainte par le produit courant, avec de fortes contraintes d'adaptation au véhicule et au choix des stylistes (le style est la première fonction d'attrait et le trait distinctif d'une automobile). Le véhicule étant dorénavant développé à un rythme accéléré, présentant d'importantes variantes architecturales, l'intégration des organes en son sein n'est pas triviale, d'autant plus qu'elle doit être faite dans des délais raccourcis. La conception des organes est aussi fortement contrainte par le système de production, capitalistique et automatisé.

[2] Elle est coûteuse (de l'ordre de 150 M€ pour une boîte de vitesses). Ces coûts fixes élevés sont compensés par une durée de vie longue (20 ans pour une famille de moteurs ou de boîtes de vitesses). D'où la nécessité de chercher les économies d'échelle et, pour ce faire, de commonaliser et de réutiliser les solutions, c'est-à-dire de raisonner en classes, familles ou lignées de produits (70 variantes pour un moteur HDi), et non en termes de produit unique et de projet "one shot".

[3] Elle est ciblée. Compte tenu du coût global des solutions, des irréversibilités qu'elles génèrent, et de leur durée de vie, toutes doivent être justifiées en termes fonctionnels, de coût global et de caractéristiques techniques (fiabilité, fabricabilité, etc.). D'où la nécessité de faire de la conception guidée par les exigences et par un "coût objectif". Ce qui suppose non seulement un savoir-faire technologique (savoir réaliser une solution technique), mais aussi de maîtriser des outils méthodologiques comme l'analyse fonctionnelle, l'analyse de la valeur, le QFD, le chiffrage paramétrique, etc. La spécification fonctionnelle devient critique dans la définition du système.

[4] Elle est justifiée et abstraite. Toutes les solutions potentielles doivent être justifiées. Ceci est valable pour les solutions innovantes. Pour minimiser les risques, les modules nouveaux sont développés en avance de phase, puis leur maturité est jugée avant de les intégrer dans le développement d'un organe courant. Cette exigence de justification se traduit par la nécessité, pour le concepteur, de développer des outils de modélisation et de validation. Jusqu'à présent, il s'agissait surtout de moyens d'essais physiques. Maintenant, les outils numériques prennent une place croissante. La conception des organes est passée d'un régime empirique à un régime scientifique.

[5] Elle est intensive en invention et innovation. La stratégie gagnante est de développer une capacité à construire une trajectoire durable d'innovations marquant le marché par l'introduction successive d'innovations technologiques adaptées aux besoins exprimés ou latents. Toutefois, l'innovation est copiable à plus ou moins brève échéance. Les axes d'innovation concernent le perfectionnement de certains organes critiques ou l'intégration de solutions techniques différentes au sein de système ou de modules multiphysiques couplés, comme pour le GMP hybride. Pour développer de telles innovations architecturales, la compétence d'architecte système est critique.

[6] Elle est résiliente. Le développement de sous-systèmes (comme l'ABS), voire des modules fonctionnels (comme la dépollution) est assuré par des équipementiers de grande taille (Bosch,

Faurecia, Delphi, Magneti-Marelli, etc.). L'architecte système est le "chef d'orchestre" de ce réseau.

[7] Elle est méthodique. Chez PSA, elle suit les principes de l'ingénierie système, développés au cours des années 1990 dans l'aéronautique, l'astronautique et le logiciel, puis institués par l'INCOSE et l'ISO au début des années 2000.

## Annexe 3. Analyse de sensibilité de la méthode de propagation

### Introduction

Une analyse de sensibilité est utile pour estimer l'influence de données ou de paramètres imprécis sur les résultats obtenus. Dans le cadre du stage de fin d'études d'un étudiant en master de statistiques appliquées, nous avons mené une analyse de sensibilité à plusieurs niveaux de la méthode :

- Sur les valeurs contenues dans les matrices DSM A et IM A-B. Il s'agit alors de tester l'influence de l'erreur (ou de l'imprécision) d'estimation de l'expert sur la matrice DSM B.
- Sur les paramètres du traitement flou (choix des fonctions d'appartenance, choix des règles).
- Sur l'algorithme de *clustering*, si nous l'incluons dans notre méthode. Notons que dans la littérature, nous n'avons trouvé que peu d'analyse de sensibilité sur les algorithmes proposés, en particulier sur l'algorithme de Thebaud.

Le principe est, partant d'une configuration initiale qui servira de référence, de perturber les données ou paramètres et de mesurer l'écart entre le résultat "de référence" et le résultat obtenu avec perturbations. Dans notre analyse, deux questions délicates se posent alors : comment modéliser les perturbations ? Comment comparer deux résultats ?

Nous avons opté pour deux analyses complémentaires.

### Analyse d'un cas réel avec des perturbations suivant une loi normale

La première est basée sur l'application industrielle de la conception d'un moteur. Partant des valeurs de la matrice MI de référence  $MI_{i,j}$ , nous avons additionné un "offset" généré suivant une loi normale de moyenne nulle et d'écart-type  $\sigma$  pour obtenir les valeurs de la matrice MI' perturbée :  $MI'_{i,j} = MI_{i,j} + \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ . Nous avons alors en sortie calculé la moyenne et l'écart-type des écarts pour toutes les valeurs entre la DSM CP "de référence" et la matrice DSM' CP obtenue en propageant les valeurs de la matrice MI'. Nous avons répété cette génération lors de 50 simulations différentes. Nous avons ensuite fait varier  $\sigma$  entre 0,2 (faible imprécision) et 1,4 (forte imprécision). Ce protocole n'inclut pas l'algorithme de *clustering* dans l'analyse et ne se base pas sur une comparaison d'architecture.

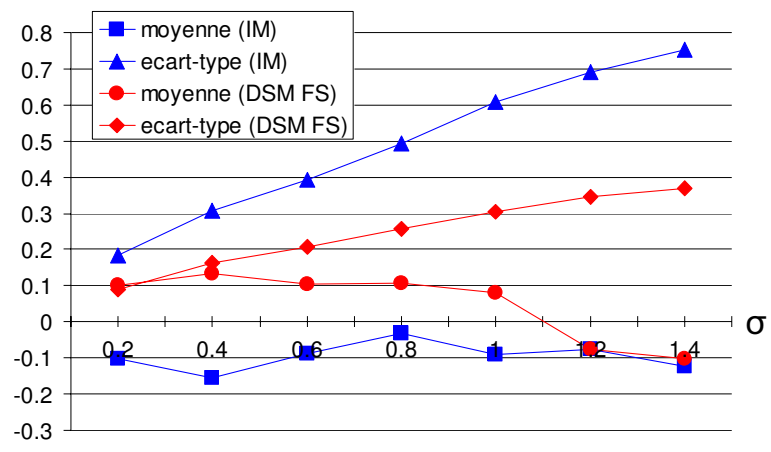


Figure 58 : Moyenne et écart type des "erreurs de sortie" en fonction de  $\sigma$

La Figure 58 présente la moyenne et écart-type des "erreurs de sortie" en fonction de l'écart-type  $\sigma$ , soit dans le cas où IM FS-CP est perturbée, soit dans le cas où DSM FS est perturbée. Cette analyse montre que la méthode est deux fois plus sensible aux erreurs dans la matrice IM FS-CP que dans celle de la matrice DSM FS. Elle montre aussi que jusqu'à une valeur de  $\sigma$  inférieure à 1, les erreurs de sortie sont globalement "acceptables" (écart-type inférieur à 0,6).

### Analyse globale incluant l'algorithme de *clustering*

Dans la seconde analyse, nous avons choisi de modéliser différemment les erreurs d'estimation dans les matrices DSM FS et MI FS-CP et ensuite, de mesurer l'influence de ces erreurs sur l'architecture optimale obtenue (après utilisation de l'algorithme de *clustering*). La difficulté est alors de pouvoir comparer deux architectures. Nous avons décidé de compter le nombre d'éléments qui ne figurent plus dans le même cluster que dans l'architecture de référence. Pour modéliser les erreurs, nous avons choisi la procédure suivante :

- chaque valeur non nulle est perturbée avec une probabilité  $p$ , que nous ferons varier de 0,2 à 1 avec un pas de 0,2 ( $p=1$  signifie que toutes les valeurs non nulles sont perturbées) ;
- si la valeur doit être perturbée, l'erreur est égale à 1 avec une probabilité de 0,75 et à 2 avec une probabilité de 0,75. Le signe de la perturbation est ensuite tiré aléatoirement, avec équiprobabilité.

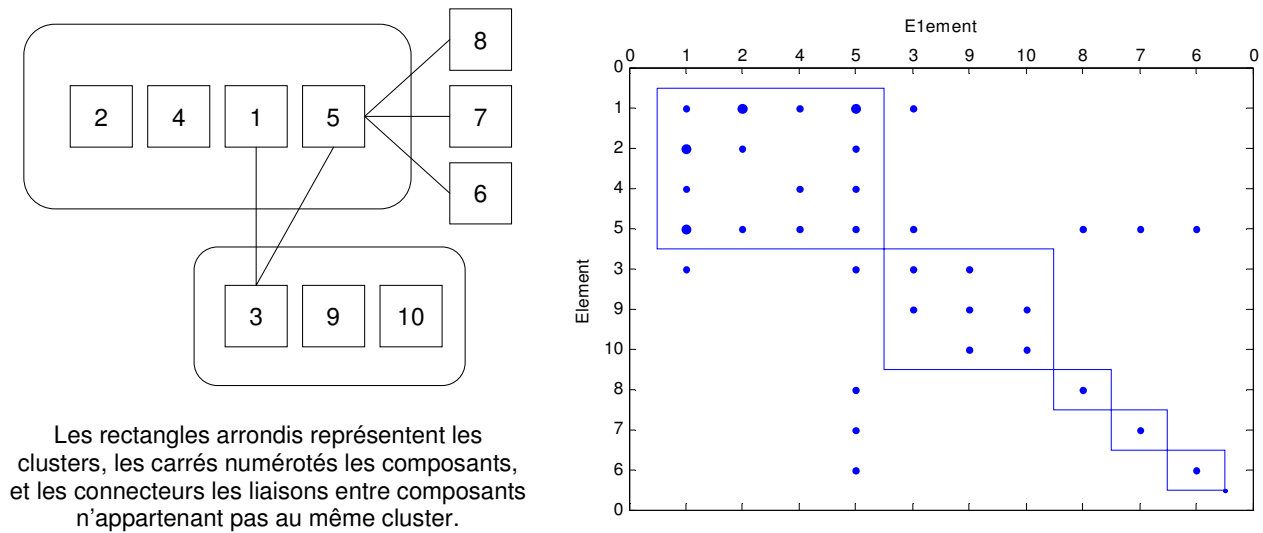
Pour chaque valeur  $p$ , nous avons généré 20 essais, c'est-à-dire 20 calculs de matrices IM perturbées et 20 comparaisons d'architecture (manuelles et laborieuses). C'est pour cette raison que nous avons choisi de créer des matrices fictives de taille plus facile à analyser, 10x10, représentées en Figure 59.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
F1	10	9	9			6			3	
F2	9	10	9		6					1
F3	9	9	10				6			
F4				10	9	9		3		
F5		6		9	10	9		3		
F6	6			9	9	10				
F7			6				10	9		1
F8				3	3		9	10		
F9	3								10	9
F10		1				1			9	10

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
C1	9	8	6	5			3			
C2		9	8			4		2		
C3		4	8		5				5	
C4	2	7		9			6			
C5	5	2			8	7	2	4		
C6					6	9	3			4
C7				6	5		9	2		
C8	2				6			8	7	
C9			3			4			9	6
C10				1				7	3	9

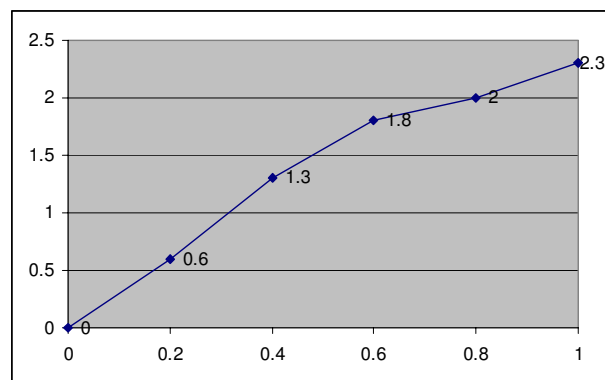
Figure 59 : Matrices fictives : DSM FS et IM FS-CP

La Figure 60 présente l'architecture de référence de la DSM CP après *clustering*, sous deux formes différentes.



**Figure 60 : Deux représentations de l'architecture de référence**

La Figure 61 montre, pour chaque probabilité  $p$ , le nombre moyen d'éléments qui ont changé de cluster. Dans ce cas, nous pouvons conclure à une bonne stabilité des clusters jusqu'à  $p=0,4$ .



**Figure 61 : Nombre moyen d'éléments changeant de cluster, en fonction de  $p$**



## Annexe 4. définitions de concepts clés pour la modélisation des activités de conception

La revue de littérature sur l'analyse et la modélisation des activités nous a permis d'acquérir une bonne vision des concepts importants à manipuler. Toutefois, chaque terme est souvent utilisé avec des sens différents ou ambigus. Nous avons donc réalisé une synthèse et proposer un cadre conceptuel cohérent pour la modélisation de l'activité de conception et de son pilotage. Ce cadre de modélisation est décrit en détail dans un chapitre de livre [Ch.2] concernant le développement des compétences.

Cette étape de recherche a été essentielle pour pouvoir ensuite mieux comprendre, analyser et modéliser les activités d'un architecte système et de son équipe.

### Acteur

Le terme d' "acteur" désigne une ressource de nature humaine de l'entreprise, qui peut être individuelle ou collective. Un acteur individuel (resp. collectif) est une personne (resp. une organisation de travail) ayant reçu la responsabilité de réaliser une mission (prescription d'un décideur) et agissant de manière permanente, temporaire ou occasionnelle, au service de l'entreprise considérée. Il existe des acteurs collectifs de différents niveaux, depuis le "binôme" jusqu'à l'entreprise considérée dans sa globalité, en passant par toutes sortes d'intermédiaires : groupes de travail, équipes projet, métiers, filières-métiers, Direction de projet, usines, etc. Un acteur collectif peut être décomposé en acteurs de plus petits cardinaux, collectifs ou individuels. Un acteur peut lui-même participer à des missions de différents acteurs collectifs de plus grands cardinaux. Il est alors important de constater que la différence porte sur l'horizon de ces missions : court, moyen, ou long terme. L'organisation matricielle, traditionnellement utilisée depuis le début des années 90 [MID 98], n'est qu'une façon de séparer ces différents types d'horizon : les acteurs ont en charge des missions à court et moyen terme (par exemple, élaborer l'architecture de l'essieu, rédiger les justifications des choix...), mais aussi des missions à long terme (par exemple, de développement des métiers et d'innovation...). Cependant, un acteur-projet peut avoir une certaine stabilité, surtout avec le concept de plateforme qui fédère un faisceau de projets et qui s'inscrit dans la durée (plus de 5 ans). La Direction de projet<sup>93</sup> est aussi à considérer comme un acteur-métier, qui développe des compétences spécifiques.

### Prestation et mission

Prestation de service et mission sont deux concepts proches. Une entité artificielle (comme une entreprise, un métier, ...) n'existe que pour répondre à des prestations de service attendues par des destinataires extérieurs. Cette prestation peut être formulée comme une mission pour l'entité. Pour remplir sa mission, l'entité décompose la mission en une coordination de sous-buts qui seront affectés à des acteurs de l'entité. Un acteur est alors investi d'une mission, c'est-à-dire de la responsabilité de réalisation d'une activité dans une situation donnée. Pour remplir sa mission, il devra déterminer l'organisation pertinente de ses actions et pour cela, bénéficiera d'une "relative" autonomie. La définition d'une mission comporte des objectifs (ou attentes) portant sur le résultat à atteindre, des exigences portant sur les actions à réaliser et des critères d'appréciation de la réussite de la mission.

### Projet

Les normes qualité ISO9000-version 2000 définissent un projet comme un "processus unique qui consiste en un ensemble d'activités coordonnées et maîtrisées comportant des dates de début et de fin, entrepris dans le but d'atteindre un objectif conforme à des exigences spécifiques telles que

<sup>93</sup> aussi appelé "conduite de l'ingénierie" au sein de DPMO

les contraintes de délai, de coûts et de ressources". Nous adoptons cette définition mais nous considérons qu'un projet n'est pas un processus mais est l'instanciation et la réalisation d'un processus unique, particulier.

### **Processus**

Dans la littérature sur la modélisation d'entreprise, différentes définitions peuvent être trouvées du concept de processus, ce qui peut le rendre ambigu. Certains auteurs attachent à ce concept un aspect temporel lié à la planification et/ou un aspect "réalisationnel" lié à l'affectation des ressources, d'autres non. Pour séparer clairement ces deux aspects, nous précisons deux concepts : processus et plan d'actions.

Une autre source d'ambiguïté provient de la relation entre système et processus. Le processus peut être interne au système et permet alors de décrire son fonctionnement. Il peut porter sur le système, qui est de ce fait vu comme l'objet du processus. Par exemple, le processus de développement, dans l'ingénierie système, fait appel à différents processus génériques (par exemple, spécification fonctionnelle, architecture fonctionnelle, analyse système) dont le but est de concevoir les processus internes au système et définir les différents processus de vie qui agissent sur le système au cours de son cycle de vie (par exemple, maintenir le système, démanteler le système).

Nous définissons un processus d'entreprise comme étant un agencement (partiellement) ordonné de sous-processus, portant sur des objets intermédiaires de même type, et dont la fin est conditionnée par des critères de transition. Son objectif porte sur la transformation progressive des entrées en résultats attendus, représentant ainsi une chaîne de valeur ajoutée. Le point central de la formalisation d'un processus est la notion d'objet, qui permet un ancrage explicite sur ce qui est concret, tangible. Le processus décrit la succession de changement d'état d'un flux d'objets de même nature (informationnels, matériels, monétaires, ...).

Contrairement à la définition des normes qualité ISO9000-version 2000, cette définition n'introduit donc pas la notion de ressources, car il est important, pour concevoir efficacement l'organisation, de séparer l'espace des buts à atteindre de l'espace des ressources pour les atteindre. Notons que notre définition est conforme avec la modélisation des processus réalisée dans la communauté travaillant sur les DSM.

En fonction du niveau de généralité, différents termes peuvent être précisés : "processus normalisé" (car faisant l'objet de normes concernant toutes les entreprises comme celles portant sur l'IS), "processus générique" (car représenté au niveau général d'une entreprise), "processus spécifique" (car représenté au niveau d'une gamme de produits semblables comme une plateforme dans l'automobile) et "processus particulier" (ou ajusté [Meinadier 2002], car défini pour un projet donné).

Un processus d'entreprise doit permettre de répondre à une mission générique, définie par le niveau stratégique. La formalisation des processus peut se faire à différents niveaux de détail. La décomposition récursive peut s'arrêter lorsque l'entreprise considère que l'acteur, à qui est attribuée la responsabilité de réalisation d'un sous-processus (sa mission), peut organiser son activité de façon autonome.

### **Plan d'actions**

Nous définissons un plan d'actions comme étant l'organisation retenue par un acteur, pour mener à bien une mission. Un plan d'actions est défini quand : (1) le but de la mission a été décomposé en sous-buts spécifiques ; (2) des ressources ont été affectées à chaque sous-but ; (3) des méthodes à suivre (état de l'art, bonnes pratiques...) ont été précisées ; (4) des jalons temporels ont été planifiés.

Au cours de l'activité, le plan d'actions sera affiné ou modifié, pour tenir compte des conditions réelles qui ne peuvent pas forcément être prévues initialement. Par exemple, en gestion de

production, on parle de plan glissant avec des décisions fermes (c'est-à-dire définitives) ou prévisionnelles (c'est-à-dire pouvant encore évoluer).

### Articulations entre les concepts clés

Le schéma de la Figure 62 positionne les concepts clés, proches de celui d'activité.

Les acteurs de l'entreprise, porteurs de compétences, sont généralement structurés en différentes entités organisationnelles appelées selon les entreprises, départements, services ou métiers. Cette organisation est prescrite et sa description fait l'objet généralement de connaissances explicites (par exemple, organigramme, lettre de missions, guide de bonnes pratiques, référentiel métier ...).

Le concept de processus, transversal à l'entreprise, agence les missions selon une décomposition d'objectifs, qui concourt à la réalisation de prestation de service devant satisfaire le client et en incarnant une logique particulière de transformation ou d'associations d'objets de toutes sortes.

Le management décide d'affecter des sous-processus à des acteurs en leur définissant des missions à remplir. L'acteur fournissant une contribution à un acteur de plus grande cardinalité (par exemple, un concepteur contribue à la mission d'une équipe-projet) doit respecter un planning de travail pour réaliser son activité.

Bénéficiant d'une "relative" autonomie dans son activité, l'acteur produit des résultats et modifie, au besoin, son plan d'action. Dans un acteur collectif, des connaissances implicites sont partagées lors des échanges et une part d'auto-organisation est possible (par exemple, mise en place opportuniste de groupe de résolution de problème, adaptation du plan d'action du collectif). Le management opérationnel facilite l'activité et l'évalue. L'évaluation de compétences permet alors de valider ou non la compétence mobilisée et éventuellement, de repérer de nouvelles compétences.

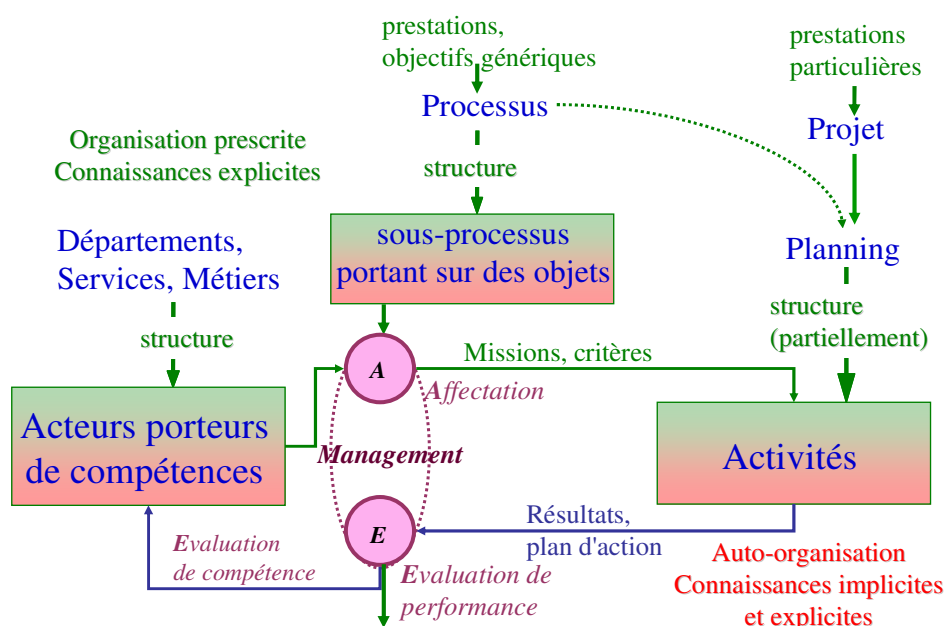


Figure 62 : Articulation entre processus, mission, activité et compétence



## **Annexe 5. [R.5]**

**X. Boucher, E. Bonjour, B. Grabot,  
"Formalisation and use of competencies for industrial performance  
optimisation: a survey",  
Computers in industry,  
Vol. 58, N°2, February 2007, pp. 98-117**



## **Annexe 6. [R.7]**

**E. Bonjour, G. Harmel, J-P. Micaëlli, M. Dulmet,  
"Simulating change propagation between product architecture and  
development organization",  
International Journal of Product Development,  
accepté pour publication en 2008, 20p.**





## **Annexe 7. [R.8]**

**O. Hlaoittinun, E. Bonjour and M. Dulmet,  
"A Multidisciplinary team building method based on competency modelling in  
design project management",  
International Journal of Management Science and Engineering Management,  
Vol. 3, N° 3, 2008, pp.163-175.**



## **Annexe 8. [R.10]**

**F. Belkadi, E. Bonjour, M. Dulmet,  
"De la modélisation des situations de travail à la caractérisation des  
compétences : une approche par la logique floue",  
JESA, Journal Européen des Systèmes Automatisés,  
Hermès Science, à paraître n°1-2, 2009, 37p.**



## **Annexe 9. [R.11]**

**B. Mtopi, M. Dulmet, E. Bonjour,**  
**"Modélisation par les grammaires de graphes de la génération de la diversité**  
**dans les familles de produits",**  
**JESA, Journal Européen des Systèmes Automatisés, Hermès Science,**  
**Hermès Science, à paraître n°1-2, 2009, 30p.**